

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Výpočty zkratových proudů v trojfázových
střídavých soustavách**

**Calculations of Short Circuits Currents in
Three-phase AC Networks**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Martin Pulkrábek

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Výpočty zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách
Calculation of Short Circuits Currents in Three-phase AC Networks

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor zkratových jevů
2. Metodika výpočtu zkratových poměrů dle ČSN EN 60909
3. Praktický příklad výpočtu zkratových proudů

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Trojánek, Z.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách. SNTL, Praha 1987.
2. Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. Montanex, Ostrava, 2008.
3. Santarius P.: Elektrické stanice a vedení. Skripta VŠB Ostrava, 1993.
4. Pauza, J., Krychtánek, Z.: Elektrické stanice. SNTL Praha, 1989.
5. Horák, K.: Výpočet elektrických sítí. SNTL Praha, 1980.
6. ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002.

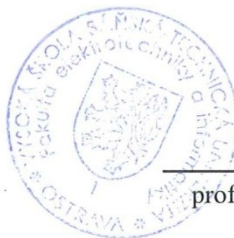
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2015


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7.5.2015

Pulkrábek

Poděkování:

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Dr. Ing. Zdeňku Medvecovi za umožnění pracovat na tomto tématu a jeho cenné rady.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je popsat zkratové jevy a výpočty zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách s aplikováním na praktickém příkladu průmyslového podniku. V úvodní části je uvedena definice zkratu, příčina vzniku zkratu a dále použití souměrných složek při jejich výpočtu. V následujících kapitolách je uvedena metodika výpočtu zkratových poměrů podle normy ČSN EN 60909. Závěrečná část obsahuje podrobnou ukázkou výpočtu zkratových poměrů jednotlivých rozvoden průmyslového podniku. Parametry prvků jsou počítány v poměrných hodnotách.

Abstract

The aim of this bachelor thesis are descriptions of short-circuit appearances and calculations of short-circuit current in a three phase systems applied on practical example of industrial plant. The introductory section provides the definition of short circuit, causes of short circuit appearances and also uses of symmetrical factors for their calculations. The following chapters introduce short-circuit calculations methodology according to regulation ČSN EN 60909. The final chapter contains detailed example of short-circuit calculation of single distribution points in industrial plant. Used parameters are featured in symmetrical quantities.

Klíčová slova

Zkrat, zkratový proud, zkratový výkon, souměrné složky, trojfázový zkrat, zkratové poměry, rozvodna, ČSN EN 60909

Key words

Short-circuit, short-circuit current, short-circuit power, symmetrical components, three-phase short-circuit, short-circuit rate, electrical substation, ČSN EN 60909

Seznam použitých symbolů a zkratek:

A	(A)	Počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$
\underline{a}	(-)	Komplexní konstanta
c	(-)	Napěťový součinitel
$c \cdot U_n / \sqrt{3}$	(V)	Napětí ekvivalentního zdroje (efektivní hodnota)
f	(Hz)	Kmitočet
I_b	(A)	Souměrný zkratový vypínací proud (efektivní hodnota)
I_k	(A)	Ustálený zkratový proud (efektivní hodnota)
I_k''	(A)	Počáteční souměrný rázový zkratový proud (efektivní hodnota)
I_{LR}	(A)	Souměrný záběrový proud asynchronního motoru
I_r	(A)	Jmenovitý proud elektrického zařízení
I_{th}	(A)	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud
$i_{d.c.}$	(A)	Stejnosměrná složka zkratového proudu
i_p	(A)	Nárazový zkratový proud
K	(-)	Korekční součinitel pro impedance
m	(-)	Činitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky
n	(-)	Činitel pro tepelné účinky střídavé složky
P_{krT}	(W)	Jmenovité ztráty nakrátko transformátoru
P_{rM}	(W)	Jmenovitý činný výkon asynchronního motoru
q_n	(mm ²)	Jmenovitý průřez
R_G	(Ω)	Rezistance synchronního stroje
R_{Gf}	(Ω)	Fiktivní rezistance
S_k''	(VA)	Počáteční souměrný rázový zkratový výkon
S_r	(VA)	Jmenovitý zdánlivý výkon elektrického zařízení
t_{min}	(s)	Minimální doba vypnutí
t_r	(-)	Jmenovitý převod transformátoru

T_K	(s)	Doba trvání zkratového proudu
U_m	(V)	Nejvyšší napětí zařízení, sdružené (efektivní hodnota)
U_n	(V)	Jmenovité napětí soustavy, sdružené (efektivní hodnota)
U_r	(V)	Jmenovité napětí zařízení, sdružené (efektivní hodnota)
u_{kr}	(%)	Jmenovité napětí nakrátko transformátoru
u_{kR}	(%)	Napětí nakrátko reaktoru omezující zkrat
$Z_{(1)}Z_{(2)}, Z_{(0)}$	(Ω)	Impedance sousledné, zpětné, netočivé zkratového obvodu
$U_{(1)}U_{(2)}, U_{(0)}$	(V)	Napětí sousledné, zpětné, netočivé složkové soustavy
$L1, L2, L3$		Fázové vodiče
X_d''	(Ω)	Rázová reaktance synchronního stroje (nasycená hodnota), podélná
x_d''	(-)	Poměrná rázová reaktance synchronního stroje, podélná
Z_k	(Ω)	Zkratová impedance trojfázové střídavé soustavy
η	(-)	Účinnost asynchronních motorů
κ	(-)	Součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu
λ	(-)	Součinitel pro výpočet ustáleného zkratového proudu
μ	(-)	Součinitel pro výpočet souměrného zkratového vypínacího proudu
ρ	($\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$)	Rezistivita (měrný odpor)
φ	($^\circ$)	Fázový úhel

Horní indexy:

„	Počáteční rázová (zkratová) hodnota)
,	Rezistance či reaktance na jednotku délky

Dolní indexy:

$(1), (2), (0)$	Sousledná složka, zpětná složka, netočivá složka
<i>a.c.</i>	Střídavý proud
<i>d.c.</i>	Stejnoseměrný proud
<i>f</i>	fiktivní
<i>k1</i>	Jednofázový zkrat
<i>k2</i>	Dvoufázový zkrat

k_{2E} příp. k_{E2E}	Dvoufázový zemní zkrat
k_3	Trojfázový zkrat
K	Impedance nebo reaktance vypočítané s impedančním korekčním součinitelem
max	Maximum
min	Minimum
n	Jmenovitá hodnota
r	Jmenovitá hodnota zařízení
V	Vedení
E	Zem
F	Místo zkratu
G	Generátor
L	Vedení, vodič
M	Asynchronní motor nebo skupina asynchronních motorů
N	Střední vodič trojfázové střídavé soustavy, uzel vinutí (při zapojení do hvězdy) generátoru nebo transformátoru
P	Svorka, pól
Q	Bod připojení nadřazené soustavy
R	Reaktor omezující zkratové proudy
T	Transformátor

Obsah

1. Úvod	1
2. Teoretický rozbor zkratových jevů	2
2.1 Zkrat	2
2.2 Příčina vzniku zkratu	3
2.3 Druhy zkratů	4
2.4 Zkraty v trojfázové soustavě při chodu naprázdno	4
2.4.1 Souměrný trojfázový zkrat	6
2.4.2 Jednofázový zkrat	7
2.4.3 Dvofázový zkrat	8
2.4.4 Dvofázový zemní zkrat	9
2.4.5 Souhrn souměrných složek impedancí	11
3. Metodika výpočtu zkratových proudů dle ČSN EN 60909-0	16
3.1 Předpoklady výpočtu	16
3.2 Metoda Výpočtu	16
3.2.1 Použití souměrných složek	16
3.2.2 Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu	18
3.3 Maximální zkratové proudy	18
3.4 Minimální zkratové proudy	19
4. Zkratové impedance elektrických zařízení elektrizační soustavy	20
4.1 Síťové napáječe	20
4.2 Transformátory	22
4.2.1 Dvouvinuťové transformátory	22
4.2.2 Trojvinuťové transformátory	23
4.3 Venkovní vedení a kabely	25
4.4 Reaktory omezující zkratový proud	25
4.5 Synchronní stroje	26
4.5.1 Synchronní generátory	26
4.5.2 Synchronní kompenzátory a motory	26
4.6 Asynchronní motory	27
5. Výpočet zkratových proudů	29
5.1 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''	29
5.1.1 Trojfázový zkrat	29
5.1.2 Dvofázový zkrat	30

5.1.3	Dvoufázový zemní zkrat	30
5.1.4	Jednofázový zkrat	31
5.2	Nárazový zkratový proud <i>i_p</i>	31
5.2.1	Trojfázový zkrat	31
5.2.2	Dvoufázový zkrat	31
5.2.3	Dvoufázový zemní zkrat	32
5.2.4	Jednofázový zkrat	32
5.3	Stejnoseměrná složka zkratového proudu	32
5.4	Souměrný vypínací zkratový proud <i>I_b</i>	32
5.4.1	Vzdálený zkrat	33
5.4.2	Blízký zkrat	33
5.4.3	Nesouměrné zkraty	33
5.5	Ustálený zkratový proud <i>I_k</i>	34
5.5.1	Maximální ustálený zkratový proud	34
5.5.2	Minimální ustálený zkratový proud	34
5.6	Jouleův integrál a ekvivalentní oteplovací zkratový proud	34
6.	Výpočet zkratových poměrů na rozvodnách průmyslového podniku	35
6.1	Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R1 22 kV	37
6.2	Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R2 22 kV	41
6.3	Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R3 6 kV	45
6.4	Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R4 6 kV	49
6.5	Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R2 6 kV	53
6.6	Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R1 6 kV	59
7.	Závěr	65

1. Úvod

Zkrat vzniká v elektrizačních soustavách úmyslným nebo náhodným vodivým spojením dvou nebo tří fází a dále v soustavách s uzemněným uzlem a také vodivým spojením jedné nebo dvou fází se zemí. Důsledkem působení nadproudu v místě zkratu se rapidně zvyšuje teplota, která má krátkodobý účinek, ale z hlediska tepelných a dynamických účinků zkratových proudů je tento jev nežádoucí až nebezpečný. Z tohoto důvodu je důležité zvolit správnou ochranu. Nejčastější ochranné prvky se používají pojistky a jističe. Slouží k rychlému a samočinnému odpojení postižené oblasti elektrického vedení od zdroje.

Tato bakalářská práce se na začátku zaměřuje na definice zkratu a příčiny vzniku zkratu. Konkrétně mezi časté příčiny vzniku zkratu patří špatná izolace kabelů a přístrojů, jiný případ může zapříčinit selhání lidského faktoru, který vede k nebezpečným úrazům. Následně se práce zabývá popisem souměrných a nesouměrných zkratů v trojfázové soustavě. Druhá část práce respektive třetí kapitola se věnuje metodikám výpočtu zkratových proudů dle ČSN EN 60909-0. Pomocí této normy lze počítat zkatové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Následující část popisuje předpoklady a metody výpočtů. Dále norma definuje vztahy pro stanovení zkratových impedancí jednotlivých elektrických zařízení v elektrizační soustavě a určuje pravidla pro výpočet zkratových proudů. Třetí část práce začínající šestou kapitolou se zabývá výpočtem zkratových poměrů rozveden průmyslového podniku. Cílem praktické části této práce bylo vypočítat zkatové proudy a výkony na jednotlivých rozvodnách.

2. Teoretický rozbor zkratových jevů

U přechodných jevů v elektrizační soustavě je nejčastější poruchou vznik zkratu, je to způsobeno tím, že místem prochází několikanásobně větší proud vzhledem ke jmenovitým hodnotám, tento proud nazýváme nadproud. Při zkratu dochází ke snížení impedance v obvodu, konkrétně mezi místem zkratu a napěťovými zdroji, které známe pod pojmem zkratový obvod.

Podle Ohmova zákona platí, že pokud by se nenacházel žádný odpor v jednotlivých částech elektrického obvodu, pak by zkratovým obvodem protékal nekonečně velký proud. Ovšem, když budeme uvažovat nad reálným zkratovým obvodem, tak v něm vždy protéká, aspoň malé množství odporu, a skládá se z impedancí vedení, kabelů, z vnitřních impedancí generátorů, transformátorů a z přechodových odporů v místě zkratu a na spojích, z toho vyplývá, že zkratový proud dosáhne konečné velikosti.

Napětí, při zkratu v elektrizační soustavě, klesá na velmi malou velikost. Celé vnitřní napětí zdroje se spotřebuje na úbytky napětí v alternátorech, kabelových, či venkovních vedení a dalších prvcích sítě.

2.1 Zkrat

Zkrat (short circuit): náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule.

Mezifázový zkrat (line-to-line short circuit): náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodiči se spojením na zem nebo bez něj.

Zkrat mezi fází a zemí (jednofázový zkrat) (line-to-earth short circuit): náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi vodičem a zemí v soustavě s uzlem uzemněným přímo nebo přes malou impedanci. [1]



Obr. 2-1 Zkrat na vzdušném vedení [8]

2.2 Příčina vzniku zkratu

V elektrických rozvodech a zařízeních může ke zkratu dojít z mnoha příčin, většinu tvoří nedokonalosti a vady, přepětí, cizí kovové (vodivé) části na holých spojích, chybná manipulace, nedostatečná zkratová odolnost a nedostatečná vzdušná vzdálenost, poškození cizími zásahy a povětrnostními vlivy.

Mnohokrát je příčina zkratu způsobena právě nedokonalostmi a vadami. Je to způsobené hlavně tím, že jde o špatnou izolaci kabelů a přístrojů, dále poškození, či znečištění izolátorů nebo vadné kontakty přístrojů atd. Závada je často způsobena špatnou výrobou nebo během provozu. Časté proudové přetížení způsobuje předčasné stárnutí izolace vodičů, nebo poškozování spojů. Nedostatky se obvykle projevují, až po delší době provozu, vlivem proudového zatížení a kvůli tomu dochází k uvolnění spojů, nadměrnému zahřívání až dochází k přetavení, vzniku elektrického oblouku a k mezifázovému zkratu.

Přepětí je častou příčinou zkratu. Je zapříčiněno zkraty v prostorech se ztíženými klimatickými podmínkami (nadmořská výška nad 1000m) a v zařízeních s nedostatečnou izolací. Přepětí dělíme na provozní (vnitřní) nebo na atmosférická (vnější).

K dokonalému zkratu dochází velmi málo. Může být způsoben neodstraněnou zkratovací soupravou na elektrickém zařízení, většinou po práci. Dále zapomenutým kovovým náradím, které se nachází na živých částech (přípojnicích), nebo porušením kabelu kovovým předmětem (výkopové práce).

Pracovníci musí dbát na svoji bezpečnost, ale stává se, že dochází k selhání lidského činitele a to vede k nejrůznějším úrazům. Chybná manipulace se často děje u odpojovačů. Odpojovače mohou odepínat pouze určité malé proudy, pokud se vypínají větší proudy, vznikne mezi kontakty odpojovače oblouk, který ionizuje prostředí mezi póly odpojovače, následně dochází po pár milisekundách k trojfázovému zkratu.

Nedostatečná zkratová odolnost vzniká na nerekonstruovaných a starších zařízení v soustavách s velkým nárůstem zkratových proudů. U nedostatečné vzdušné doskokové vzdálenosti může dojít vlivem přepětí k přeskokům a ke zkratům, nastane-li vlivem dynamických sil při zkratu nebo jiným zásahem přiblížení vodičů pod předepsanou normu.

Poškození cizími zásahy a povětrnostními vlivy je obvyklou příčinou vzniku zkratu. U kabelových rozvodů v zemi při práci zahrnující úpravy terénu, výkopy apod. U venkovního vedení hrozí pád větví na vedení, dotykem větví na vedení při silném větru, ptactvem atd.

Tab. 2-1 Pravděpodobnost výskytu jednotlivých druhů zkratů v procentech

Druh zkratu	Pravděpodobnost výskytu (%)		
	VN	110 kV	220 kV
Trojfázový	5	0,6	0,9
Dvoufázový	10	4,8	0,6
Dvoufázový zemní	20	3,8	5,4
Jednofázový	65	91	93,1

2.3 Druhy zkratů

V trojfázové soustavě se zkraty rozdělují na dva typy. Jedním typem jsou zkraty souměrné a druhým typem jsou zkraty nesouměrné.

Souměrný zkrat nastává, při kovovém dotyku všech tří fází navzájem v jednom místě. Jedná se o zkrat trojfázový. Jestli se všechny tři fáze spojí se zemí, tak se jedná o trojfázový zemní zkrat, v tomto případě nezáleží na uzemnění uzlu. Ve všech fázích prochází stejný zkratový proud.

Nesouměrný zkrat vzniká tehdy, pokud všechny fáze nejsou zatíženy souměrně. Do nesouměrných zkratů řadíme jednofázový zkrat, který nastane při spojení jedné fáze se zemí s uzemněným uzlem. Dále dvoufázový zkrat, u kterého dochází ke spojení dvou fází v jednom místě a nezáleží na uzemnění uzlu. Dvoufázový zemní zkrat nastává při spojení dvou různých fází a současně se spojí s uzemněným uzlem. Jak bylo zmíněno, tak u těchto případů se výsledné hodnoty zkratového proudu nezúčastní všechny tři fáze stejnou měrou, proto se výpočty řeší rozkladem proudů a napětí na souměrné složky, které dělíme na souslednou, zpětnou a netočivou složku, podle druhu zkratu.

2.4 Zkraty v trojfázové soustavě při chodu naprázdno

Máme dané jednoduché zapojení symetrické trojfázové soustavy se synchronním strojem jako zdrojem napětí sousledné složkové soustavy. Impedance obvodu se skládá z impedance synchronního stroje a impedance vnější části obvodu. Určení fázorů napětí a proudů L_1 , L_2 , L_3 v soustavě souměrných složek:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{L1} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_{L2} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_{L3} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(2)}\end{aligned}\quad (2.1)$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_{L1} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L2} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L3} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)}\end{aligned}\quad (2.2)$$

Jednotlivé indexy (0),(1) a (2) značí netočivou, souslednou a zpětnou složku.

Jednotkové fázory natočení jsou:

$$\begin{aligned}\underline{a} &= -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{2\pi}{3} \\ \underline{a}^2 &= -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = -\frac{2\pi}{3} \\ 1 + \underline{a}^2 + \underline{a} &= 0\end{aligned}\tag{2.3}$$

Souměrné složky vnitřního napětí synchronního stroje označíme $\underline{U}_{i(1)}$, $\underline{U}_{i(2)}$, $\underline{U}_{i(3)}$, souměrné složky napětí v místě zkratu $\underline{U}_{(1)}$, $\underline{U}_{(2)}$, $\underline{U}_{(0)}$ a složkové proudy $\underline{I}_{(1)}$, $\underline{I}_{(2)}$, $\underline{I}_{(0)}$. Následně platí tyto vztahy:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{i(1)} &= \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ \underline{U}_{i(2)} &= \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{I}_{(2)} + \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_{i(0)} &= \underline{Z}_{(0)} \cdot \underline{I}_{(0)} + \underline{U}_{(0)}\end{aligned}\tag{2.4}$$

Synchronní stroj je vždy zdrojem sousledné složky napětí, poté platí tyto vztahy při chodu na prázdno:

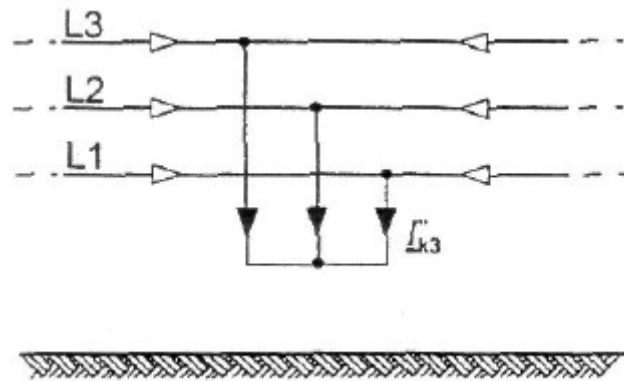
$$\begin{aligned}\underline{U}_{i(1)} &= \underline{U}_i = \underline{U}_f \\ \underline{U}_{i(2)} &= 0 \\ \underline{U}_{i(0)} &= 0\end{aligned}\tag{2.5}$$

\underline{U}_f je fázor napětí na svorkách synchronního stroje.

Kde základní rovnice složkových soustav mají následující tvar:

$$\begin{aligned}\underline{U}_i &= \underline{U}_f = \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ 0 &= \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{I}_{(2)} + \underline{U}_{(2)} \\ 0 &= \underline{Z}_{(0)} \cdot \underline{I}_{(0)} + \underline{U}_{(0)}\end{aligned}\tag{2.6}$$

2.4.1 Souměrný trojfázový zkrat



Obr. 2-2 Trojfázového zkratu [1]

V tomto případě zkratu platí následující vztah:

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_{L2} = \underline{U}_{L3} = 0 \quad (2.7)$$

Z toho vyplývá podle rovnice (2.1) vztahy:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L1} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} = 0 \\ \underline{U}_{L2} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{(2)} = 0 \\ \underline{U}_{L3} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(2)} = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Sečtením těchto rovnic dostaneme $\underline{U}_{(0)} = 0$. Při úvaze zmiňované hodnoty odečtením druhé rovnice od první pak platí vztah:

$$\underline{U}_{(0)} = \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(2)} = 0 \quad (2.9)$$

Po dosazení do základních rovnic (2.6) a při předpokladu chodu naprázdno ($\underline{U}_i = \underline{U}_f$), bude platit vztah:

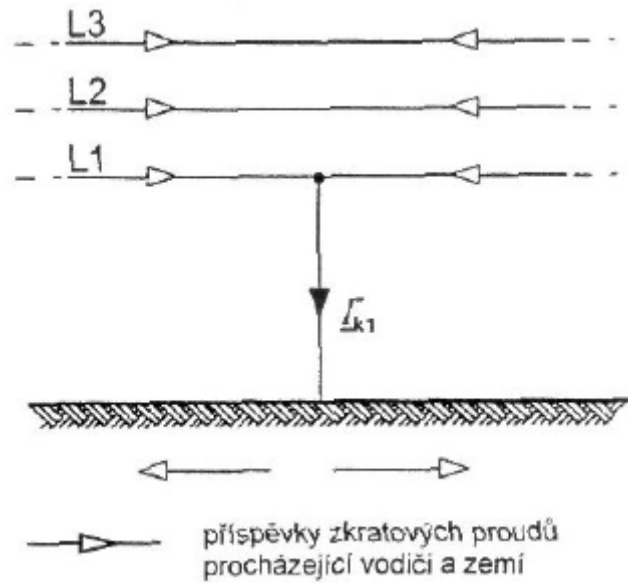
$$\underline{I}_{(1)} = \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)}}; \quad \underline{I}_{(2)} = 0; \quad \underline{I}_{(0)} = 0 \quad (2.10)$$

Dosazením do rovnice (2.2) je možno objevit zkratové proudy v jednotlivých fázích:

$$\underline{I}_{L1} = \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)}}; \quad \underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \cdot \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)}}; \quad \underline{I}_{L3} = \underline{a} \cdot \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)}} \quad (2.11)$$

Sousledná složková soustava se uplatní pouze při trojfázovém zkratu.

2.4.2 Jednofázový zkrat



Obr. 2-3 Jednofázového zkratu [1]

V místě poruchy jednofázového zkratu platí:

$$\underline{U}_{L3} = 0; \underline{I}_{L1} = \underline{I}_{L2} = 0 \quad (2.12)$$

Ze základních rovnic (2.1) a (2.2) dostaneme:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L3} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} = 0 \\ \underline{I}_{L1} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)} = 0 \\ \underline{I}_{L2} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)} = 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Odečtením proudových rovnic získáme:

$$(\underline{a} - \underline{a}^2) \cdot \underline{I}_{(1)} + (\underline{a}^2 - \underline{a}) \cdot \underline{I}_{(2)} = 0 \quad (2.14)$$

Ze vztahu plyne $\underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)}$.

Dosazením do rovnice pro \underline{I}_{L2} ze vztahu (2.13) dostaneme $\underline{I}_0 = \underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)}$.

Rovnice pak budou vypadat:

$$\begin{aligned} \underline{U}_i &= \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ 0 &= \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} \\ 0 &= \underline{Z}_{(0)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(0)} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Při sečtení těchto rovnic a respektování rovnice (2.13) bude platit vztah:

$$\underline{U}_i = (\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}) \cdot \underline{I}_{(1)} \quad (2.16)$$

Odtud dostaneme:

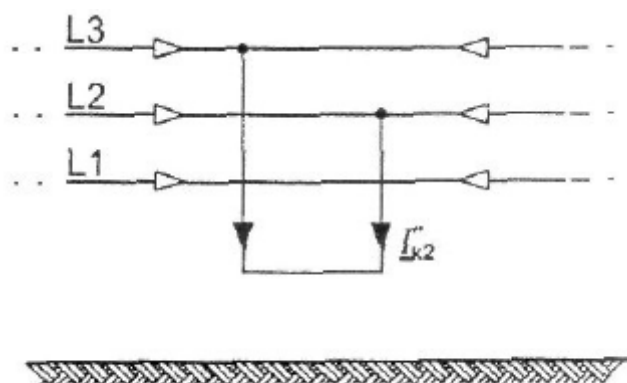
$$\underline{I}_{(0)} = \underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (2.17)$$

Zkratový proud ve fázi L3, jestli ($\underline{U}_i = \underline{U}_f$), bude vypadat vztah:

$$\underline{I}_{L3} = \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} = \frac{3 \cdot \underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (2.18)$$

konkrétně u jednofázového zkratu je nutné určit všechny tři složkové impedance.

2.4.3 Dvoufázový zkrat



Obr. 2-4 Dvoufázového zkratu [1]

U dvoufázového zkratu platí vztahy:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L2} &= \underline{U}_{L3} \rightarrow \underline{U}_{L2} - \underline{U}_{L3} = 0 \\ \underline{I}_{L1} &= 0; \underline{I}_{L3} = -\underline{I}_{L2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Dosazením do rovnic (2.2) dostaneme vztahy:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{L1} &= 0 = \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L2} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L3} &= -\underline{I}_{L2} = \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Sečtením rovnic dostaneme $\underline{I}_{(0)} = 0$. Z první rovnice pak plyne $\underline{I}_{(1)} = -\underline{I}_{(2)}$. V tomto případě neexistuje netočivá složka, protože se musí uzavírat čtvrtým vodičem nebo zemí.

Z rovnic (2.1) vychází $\underline{U}_{(0)} = 0$ a platí:

$$\underline{U}_{L2} - \underline{U}_{L3} = 0 = (\underline{a}^2 - \underline{a}) \cdot \underline{U}_{(1)} + (\underline{a} - \underline{a}^2) \cdot \underline{U}_{(2)} \rightarrow \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(2)} \quad (2.21)$$

Dosazením do rovnic (2.6) platí následující vztahy:

$$\begin{aligned} \underline{U}_i &= \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ 0 &= -\underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ 0 &= 0 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Odečtením vznikne rovnice:

$$\underline{U}_i = (\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}) \cdot \underline{I}_{(1)} \quad (2.23)$$

A odtud:

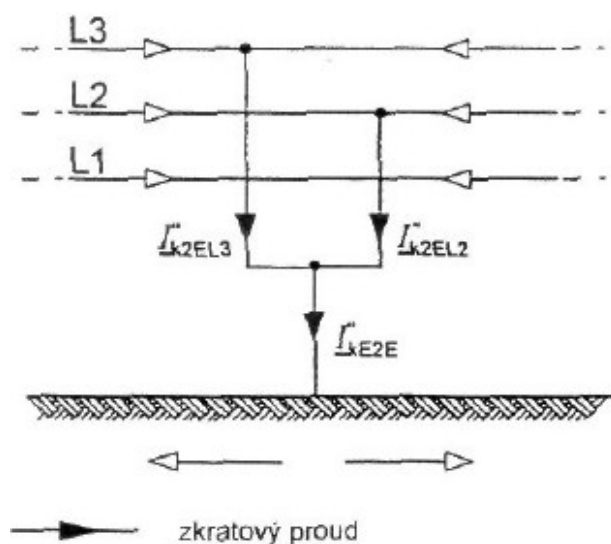
$$\underline{I}_{(1)} = -\underline{I}_{(2)} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \quad (2.24)$$

Zkratový proud ve fázi L3 ($\underline{U}_i = \underline{U}_f$):

$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)} = (\underline{a} - \underline{a}^2) \cdot \underline{I}_{(1)} = j \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \quad (2.25)$$

U dvoufázového zkratu je potřeba zjistit zpětnou a souslednou složkovou impedanci.

2.4.4 Dvoufázový zemní zkrat



Obr. 2-5 Dvoufázového zemního zkratu [1]

V místě poruchy platí vztah:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L2} &= \underline{U}_{L3} = 0 \\ \underline{I}_{L1} &= 0 \end{aligned} \quad (2.26)$$

Z rovnic (2.1) a (2.2) vyplývá:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{L1} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} = 0 \rightarrow \underline{I}_{(0)} = -(\underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)}) \\ \underline{U}_{L2} - \underline{U}_{L3} &= 0 = (\underline{a}^2 - \underline{a}) \cdot \underline{U}_{(1)} + (\underline{a} - \underline{a}^2) \cdot \underline{U}_{(2)} \rightarrow \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_{L2} &= 0 = \underline{U}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{(2)} = (\underline{a}^2 + \underline{a}) \cdot \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(0)} \\ &= -\underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(0)} \rightarrow \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(0)} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Rovnice (2.6), pak mají tvar:

$$\begin{aligned} \underline{U}_i &= \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(0)} \\ 0 &= \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{I}_{(2)} + \underline{U}_{(0)} \\ 0 &= -\underline{Z}_{(0)} \cdot (\underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)}) + \underline{U}_{(0)} \end{aligned} \quad (2.28)$$

První rovnici vynásobíme $\underline{Y}_{(1)} = \underline{Z}_{(1)}^{-1}$.

Druhou rovnici vynásobíme $\underline{Y}_{(2)} = \underline{Z}_{(2)}^{-1}$.

Třetí rovnici vynásobíme $\underline{Y}_{(0)} = \underline{Z}_{(0)}^{-1}$.

V dalším kroku všechny tři rovnice sečteme a dostaneme:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{(1)} \cdot \underline{U}_i &= (\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}) \cdot \underline{U}_{(0)} \\ \underline{U}_{(0)} &= \frac{\underline{Y}_{(1)}}{\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}} \cdot \underline{U}_i \end{aligned} \quad (2.29)$$

Jednotlivé složkové proudy z rovnic (2.28) po dosazení za $\underline{U}_{(0)}$ mají tvar:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{(1)} &= \underline{Y}_{(1)} \cdot (\underline{U}_i - \underline{U}_{(0)}) = \underline{Y}_{(1)} \cdot \frac{\underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}}{\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}} \cdot \underline{U}_i \\ \underline{I}_{(2)} &= -\underline{Y}_{(2)} \cdot \underline{U}_{(0)} = -\frac{\underline{Y}_{(2)} \cdot \underline{Y}_{(1)}}{\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}} \cdot \underline{U}_i \\ \underline{I}_{(0)} &= -\underline{Y}_{(0)} \cdot \underline{U}_{(0)} = -\frac{\underline{Y}_{(0)} \cdot \underline{Y}_{(1)}}{\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}} \cdot \underline{U}_i \end{aligned} \quad (2.30)$$

Následně stanovíme hledané zkratové proudy ve fázích L2, L3 s využitím rovnic (2.2):

$$\begin{aligned} \underline{I}_{L2} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L3} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Proud tekoucí zemí je roven součtu proudů $\underline{I}_{L2}, \underline{I}_{L3}$:

$$\begin{aligned} (\underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3}) &= 2 \cdot \underline{I}_{(0)} + (\underline{a}^2 + \underline{a}) \cdot \underline{I}_{(1)} + (\underline{a} + \underline{a}^2) \cdot \underline{I}_{(2)} = \\ &= 2 \cdot \underline{I}_{(0)} - (\underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)}) = 3 \cdot \underline{I}_{(0)} \end{aligned} \quad (2.32)$$

U dvoufázového zemního zkratu je potřeba určit všechny tři složkové impedance.

2.4.5 Souhrn souměrných složek impedancí

Tab. 2-2 Přehled souměrných složek impedancí ve vztahu k jednotlivému typu zkratu

Typ zkratu	Souměrné složky impedancí
Trojfázový	$\underline{Z}_{(1)}$
Jednofázový	$\underline{Z}_{(1)}, \underline{Z}_{(2)}, \underline{Z}_{(0)}$
Dvoufázový	$\underline{Z}_{(1)}, \underline{Z}_{(2)}$
Dvoufázový zemní	$\underline{Z}_{(1)}, \underline{Z}_{(2)}, \underline{Z}_{(0)}$

Poznámka: pro výpočet jednotlivých typů zkratů je potřeba určit složky impedancí (sousedná, zpětná a netočivá) podle Tab. 2-2 . [4]

2.5 Základní pojmy

Zkratový proud (short-circuit current): nadproud v důsledku zkratu v elektrické soustavě

Předpokládaný zkratový proud (prospective (available) short-circuit current): proud, který by protékal obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí bez změny napájení.

Souměrný zkratový proud (symmetrical short-circuit current): efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbanou eventuální aperiodickou složkou proudu.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' (initial symmetrical short-circuit current I_k''): efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci.

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' (initial symmetrical short-circuit power S_k''): pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , jmenovitého napětí sítě U_n a součinitele $\sqrt{3}$: pak tedy $S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k''$.

Poznámka: počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' se v této normě pro výpočetní postupy nepoužívá. Pokud se S_k'' přesto použije v souvislosti se zkratovými výpočty,

například pro výpočet vnitřní impedance síťového napáječe ve spojovacím bodě Q, potom se musí použít definice v následujícím tvaru $S_{kQ}'' = \sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I_{kQ}''$ nebo $Z_Q = c \cdot U_{nQ}^2 / S_{kQ}''$.

Stejnoseměrná (aperiodická) složka $i_{d.c.}$ zkratového proudu (decaying (aperiodic) component $i_{d.c.}$ of short-circuit current): střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule.

Nárazový zkratový proud i_p (peak short-circuit current i_p): maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu.

Poznámka: velikost nárazového zkratového proudu závisí na okamžiku, v němž ke zkratu došlo. Výpočet třífázového nárazového proudu i_p se aplikuje na fázový vodič a okamžik, ve kterém vznikne největší možný zkratový proud. Nesoučasné zkraty se neuvažují.

Souměrný zkratový vypínací proud i_b (symmetrical short-circuit breaking current i_b): efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení.

Ustálený zkratový proud I_k (steady-state short-circuit current I_k): efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu.

Záběrový proud I_{LR} (symmetrical locked-rotor current I_{LR}): největší souměrný efektivní proud asynchronního motoru se zabrzděným rotorem, který je napájen jmenovitým napětím U_{rM} při jmenovitém kmitočtu.

Ekvivalentní elektrický obvod (equivalent electric circuit): model určený k popisu chování obvodu pomocí sítě ideálních prvků.

Jmenovité napětí sítě U_n (nominal system voltage U_n): sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky.

Poznámka: hodnoty jsou uvedeny v normě IEC 60038

Napětí ekvivalentního zdroje $c \cdot U_n / \sqrt{3}$ (equivalent voltage source $c \cdot U_n / \sqrt{3}$): napětí ideálního zdroje přiložené v místě zkratu v sousledné složkové soustavě pro výpočet zkratového proudu, jedná se o jediné aktivní napětí sítě.

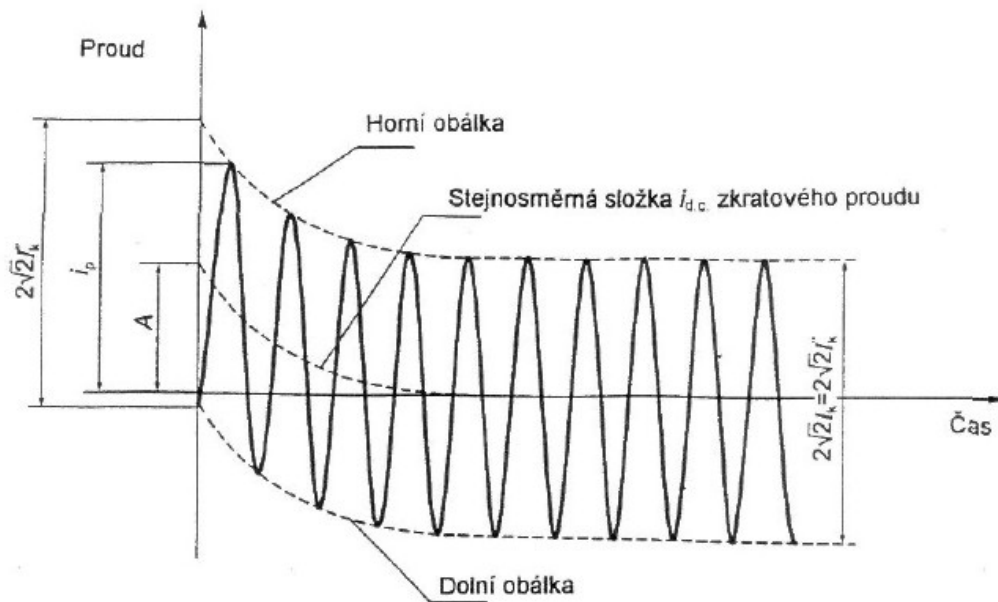
Napěťový součinitel c (voltage factor c): poměr mezi napětím ekvivalentního napěťového zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n děleným $\sqrt{3}$.

Poznámka: uvedený napěťový součinitel c je nutný z následujících důvodů:

- Kolísání napětí v závislosti na čase a místě
- Přepínání odboček transformátoru
- Zanedbání zátěže a kapacitních reaktancí
- Chování generátorů a motorů při přechodném ději

Rázové napětí synchronního stroje E'' (subtransient voltage E'' of a synchronous machine): efektivní hodnota souměrného vnitřního napětí synchronního stroje, které působí za rázovou reaktancí X_d'' v okamžiku zkratu.

Elektricky vzdálený zkrat (far-from-generator short circuit): zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní.



Obr. 2-6 Zkratový proud elektricky vzdáleného zkratu s konstantní střídavou složkou
[1]

I_k'' - je počáteční souměrný rázový zkratový proud

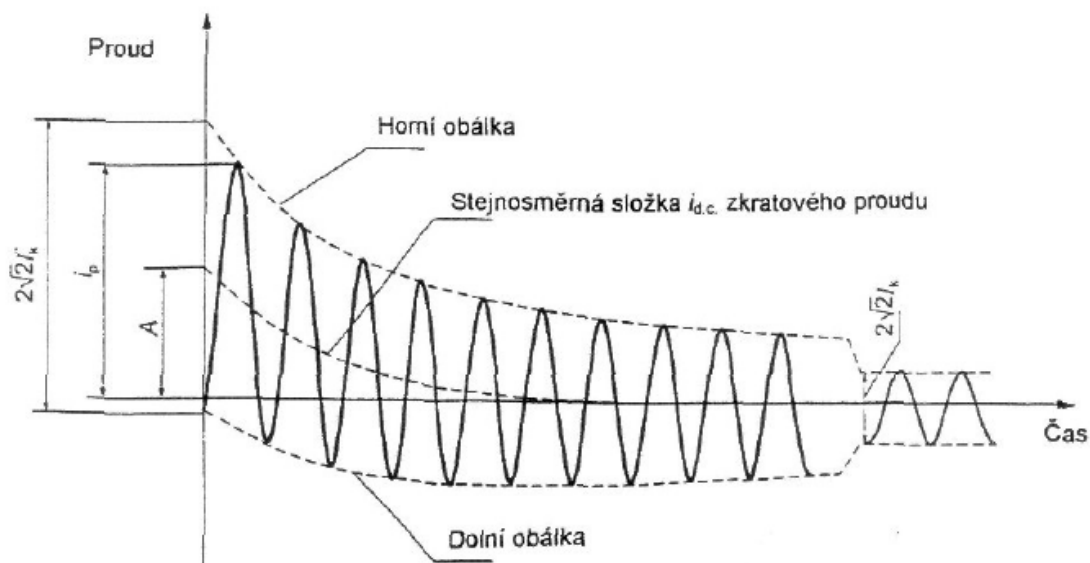
i_p - nárazový zkratový proud

i_k - ustálený zkratový proud

$i_{d.c.}$ - stejnosměrná složka zkratového proudu

A - počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$

Elektricky blízký zkrat (near-to-generator short circuit): zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5% počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motoru.



Obr. 2-7 Zkratový proud elektricky blízkého zkratu s klesající střídavou složkou [1]

I_k'' - je počáteční souměrný rázový zkratový proud

i_p - nárazový zkratový proud

i_k - ustálený zkratový proud

$i_{d.c.}$ - stejnosměrná složka zkratového proudu

A - počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$

Zkratové impedance v místě zkratu F (short-circuit impedances at the short-circuit location F)

Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$ trojfázové střídavé soustavy (positive-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(1)}$ of a three-phase a.c. systém): impedance sousledné složkové soustavy viděná z místa zkratu.

Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ trojfázové střídavé soustavy (negative-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(2)}$ of a three-phase a.c. systém): impedance zpětné složkové soustavy viděná z místa zkratu.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ trojfázové střídavé soustavy (zero-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(0)}$ of a three-phase a.c. systém): impedance netočivé složkové soustavy viděná z místa zkratu. Zahrnuje trojnásobek impedance \underline{Z}_N mezi uzlem transformátoru a zemí.

Zkratová impedance \underline{Z}_k trojfázové střídavé soustavy (short-circuit impedance \underline{Z}_k of a three-phase a.c. systém): zkrácené označení pro souslednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(1)}$, pro výpočet proudů při trojfázovém zkratu.

Zkratové impedance elektrického zařízení (short-circuit impedances of electrical equipment)

Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$ elektrického zařízení (positive-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(1)}$ of electrical equipment): poměr fázového napětí a zkratového proudu příslušné fáze elektrického zařízení při napájení ze souměrné sousledné složkové soustavy napětí.

Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ elektrického zařízení (negative-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(2)}$ of electrical equipment): poměr fázového napětí a zkratového proudu příslušné fáze elektrického zařízení při napájení ze souměrné zpětné složkové soustavy napětí.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ elektrického zařízení (zero-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(0)}$ of electrical equipment): poměr napětí proti zemi a zkratového proudu jedné fáze elektrického zařízení při napájení ze střídavého napěťového zdroje, přičemž tři paralelní fázové vodiče jsou použity pro proud vycházející ze zdroje a čtvrtý vodič nebo zem tvoří společné zpětné vedení.

Rázová reaktance X_d'' synchronního stroje (subtransient reactance X_d'' of a synchronous machine): reaktance uplatňující se v okamžiku zkratu, pro výpočet zkratových proudů se používá nasycená hodnota X_d'' .

Poznámka: jestliže reaktanci X_d'' v ohmech dělíme jmenovitou impedancí $Z_{rG} = U_{rG}^2 / S_{rG}$ synchronního stroje, obdržíme výsledek v poměrných jednotkách, který je označen malým písmenem $x_d'' = X_d'' / Z_{rG}$.

Minimální doba vypnutí t_{\min} (minimum time delay t_{\min}): nejkratší čas mezi počátkem zkratového proudu a přerušením kontaktu prvního vypínacího pólu spínacího přístroje.

Poznámka: čas t_{\min} je součtem nejkratší možné doby působení mžikové ochrany a nejkratšího vypínacího času vypínače. K nastavitelnému časovému zpoždění vypínacího zařízení se nepřihlíží.

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} (thermal equivalent short-circuit current I_{th}): efektivní hodnota, která má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění. [1]

3. Metodika výpočtu zkratových proudů dle ČSN EN 60909-0

Pomocí ČSN EN 60909-0 lze počítat zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Norma platí pro soustavy:

- Nízkého napětí 50 V - 1000 V
- Vysokého napětí 1000 V – 52 kV
- Velmi vysokého napětí 52 kV – 300 kV
- Zvláště vysokého napětí 300 kV – 550 kV

Při jmenovitém kmitočtu 50 Hz nebo 60 Hz. [1,6]

3.1 Předpoklady výpočtu

Pro snadnější výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů se vychází z následujících zjednodušení:

- a) Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí.
- b) Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- c) Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance K_T pro síťové transformátory.
- d) Odpory oblouku se neuvažují.
- e) Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Výpočty zaručují adekvátní přesnost výsledků, ovšem zmíněné předpoklady pro uvažované elektrické soustavy, nelze brát zcela přesně za odpovídající dané skutečnosti.

Při počítání zkratových proudů s rozdílnými hladinami napětí v soustavách, je potřeba přepočítat hodnoty impedancí z jedné napěťové hladiny na jinou, zpravidla na napěťovou hladinu, ve které se má určit zkratový proud. [1]

3.2 Metoda Výpočtu

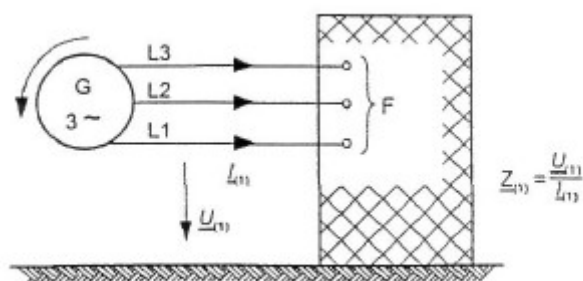
3.2.1 Použití souměrných složek

Zásadou použití souměrných složek se zjednoduší výpočet hodnot proudů v trojfázových střídavých soustavách při souměrných a nesouměrných zkratech. Předpokládá se, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu, například v případě transponovaných venkovních vedení. U netransponovaných venkovních vedení mají výsledky výpočtu zkratových proudů dostatečnou přesnost.

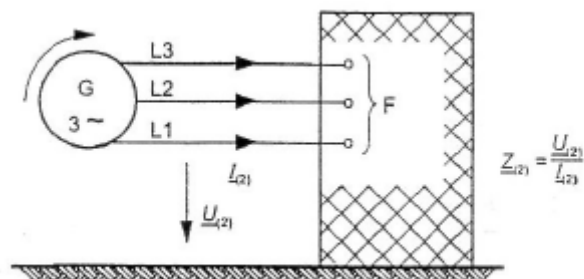
U této metody se vyskytují tři složkové soustavy:

- 1) Sousedná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(1)}$
- 2) Zpětná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(2)}$
- 3) Netočivá složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(0)}$

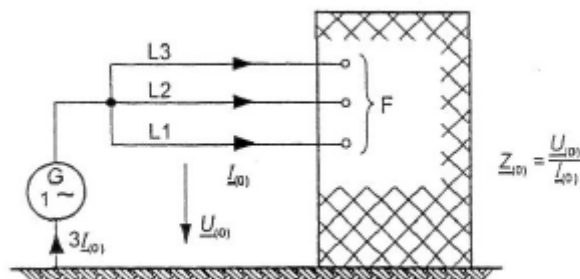
- 1) Sousednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(1)}$ v místě zkratu F určíme podle obrázku, když souměrnou soustavu napětí sousledné složky v odpovídajícím pořadí fází (kladném) přiložíme do místa zkratu F, všechny synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny jejich vnitřními impedancemi.
- 2) Zpětnou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(2)}$ v místě zkratu F určíme podle obrázku, když souměrnou soustavu napětí zpětné složky v odpovídajícím pořadí fází (záporném) přiložíme do místa zkratu F.
- 3) Netočivou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(0)}$ v místě zkratu F určíme podle obrázku, když přiložíme střídavé napětí mezi třemi zkratovými fázemi a společným zpětným vedením (např. nulovým vodičem, zemnicí soustavou nebo stíněním kabelu a pláštěm kabelu).



Obr. 3-1 Sousedná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(1)}$ [1]



Obr. 3-2 Zpětná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(2)}$ [1]



Obr. 3-3 Netočivá složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(0)}$ [1]

- Každá z těchto tří souměrných složek soustavy má svoji vlastní impedanci.
- Zmiňovaná norma pojednává o nesouměrných zkratech (dvoufázový zkrat, dvoufázový zemní zkrat a jednofázový zkrat).
- Pro účely této normy je nutné rozlišovat mezi zkratovými impedancemi v místě zkratu F a zkratovými impedancemi každého elektrického zařízení.
- Hodnoty sousledných a zpětných impedancí se mohou navzájem lišit pouze v případě točivých strojů. Pokud se počítají elektricky vzdálené zkraty, je obecně dovoleno uvažovat $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$.

3.2.2 Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu

Metoda použitá pro výpočet je založena na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Ekvivalentní napěťový zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny síťové napáječe, asynchronní a synchronní stroje jsou nahrazovány svou vnitřní impedancí.

Provozní údaje o odběrech, poloze přepínače odboček transformátorů, buzení generátorů atd. nejsou důležité, odpadá nutnost provádět výpočty toků výkonů v různých stavech před zkratem. Ve všech případech se k určení zkratového proudu v místě F použije ekvivalentní napěťový zdroj.

3.3 Maximální zkratové proudy

Při výpočtu maximálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- Pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{max} podle tabulky 3-1, pokud není příslušná národní norma.
- Vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu nebo pro přijaté dělení sítě pro omezení zkratového proudu.
- Pokud je použita ekvivalentní impedance \underline{Z}_Q jako reprezentující vnější síť, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů.
- Motory musí být zahrnuty podle potřeby.
- Uvažují se rezistance R_L vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20°C .

Poznámka: maximální zkratový proud se zjišťuje pro volbu, dimenzování a určení zkratové odolnosti elektrického přístroje.

3.4 Minimální zkratové proudy

Při výpočtu minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- Pro výpočet minimálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{min} , podle tabulky 3-1.
- Vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu.
- Motory musí být zanedbány.
- Rezistance R_L vedení (venkovních vedení a kabelů, vodičů a středních vodičů) se musí uvažovat při nejvyšší teplotě.

$$R_L = [1 + \alpha(\theta_e - 20^\circ\text{C})]R_{L20}$$

kde

R_{L20} - je rezistance při teplotě 20°C

θ_e - teplota vodiče ve stupních Celsia na konci zkratu

Poznámka: minimální zkratový proud stanovuje nastavení ochran ve zkratovém obvodu.

Tab. 3-1 Napěťový součinitel c

Jmenovité napětí U_n	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	Maximálních zkratových proudů c_{max} ¹⁾	Minimálních zkratových proudů c_{min}
Nízké napětí 100 V až 1000 V	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí >1 kV až 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí ²⁾ > 35 kV		

¹⁾ $c_{max} U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav.

²⁾ Pokud není jmenovité napětí definováno potom $c_{max} U_n = U_m$ nebo $c_{min} U_n = 0,90 \cdot U_m$.

³⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6%, např. pro soustavy přecházející z 380 V na 400V.

⁴⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10%

4. Zkratové impedance elektrických zařízení elektrizační soustavy

Sousledná a zpětná zkratová impedance soustavy jsou si rovny $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ u elektrických zařízení, které se dělí na transformátory, síťové napáječe, venkovní a kabelového vedení, reaktory, synchronní stroje atd.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)} = \underline{U}_{(0)}/\underline{I}_{(0)}$ se určuje ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (např. zemnicím zařízením, nulovým vodičem atd.). Společným zpětným vedením protéká trojnásobek proudu netočivé složky.

Jestliže se zkratové proudy počítají pomocí ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu, tak impedance generátorů (G), síťových transformátorů (T) a elektrárenských bloků (S) se musí vynásobit impedančními korekčními součiniteli K_G , K_T a K_{SO} .

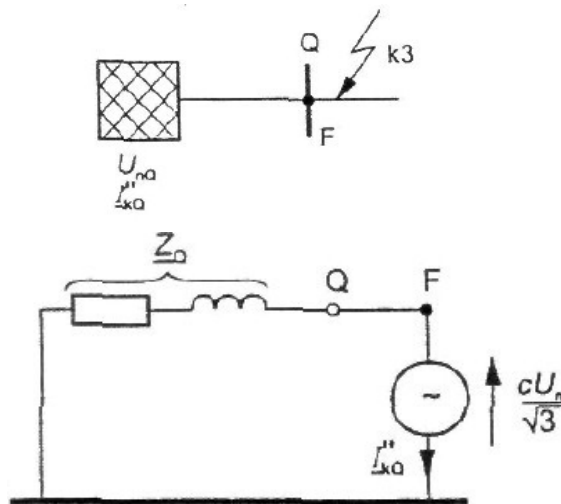
4.1 Síťové napáječe

Jestli je trojfázový zkrat podle obrázku 4-1 napájen přímo ze sítě, kde je znám pouze I''_{kQ} , pak ekvivalentní impedance sítě Z_Q (sousledná zkratová impedance) v bodě připojení napáječe Q se určuje:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad (4.1)$$

V případě je-li znám R_Q/X_Q , pak X_Q bude ve tvaru:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} \quad (4.2)$$



Obr. 4-1 Schéma soustavy a ekvivalentní náhradní schéma pro síťového napáječe bez transformátoru [1]

Pokud je zkrat v souladu s obrázkem 4-2 napájen transformátorem ze sítě vysokého napětí, velmi vysokého napětí a zvláště vysokého napětí, u které je znám pouze I_{kQ}'' v bodě připojení Q, pak lze souslednou ekvivalentní zkratovou impedanci Z_{Qt} vztaženou ke straně transformátoru s nižším napětím stanovit ve tvaru:

$$Z_{Q1} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (4.3)$$

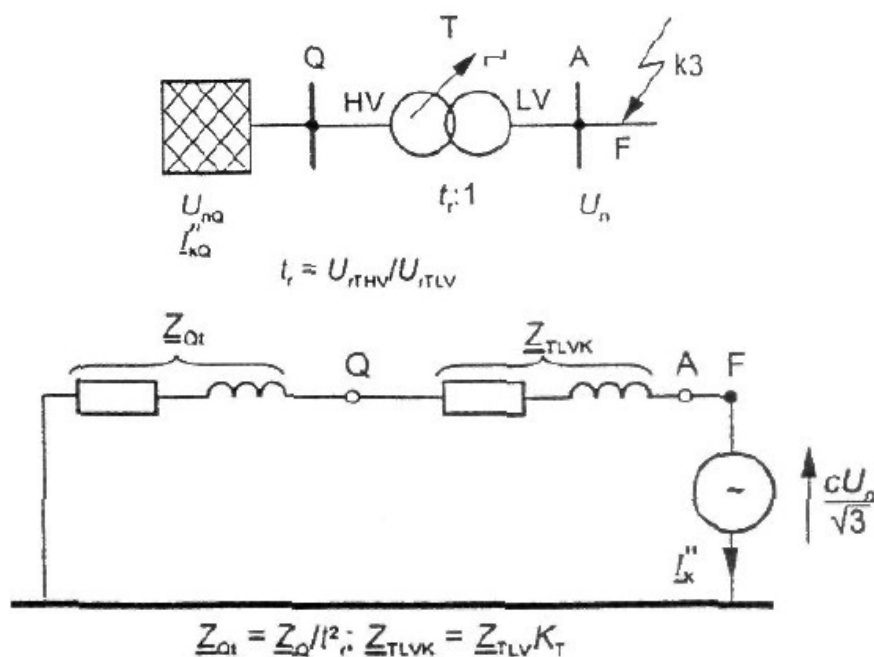
kde

I_{kQ}'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q;

U_{nQ} jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q;

c napěťový součinitel pro napětí U_{nQ} ;

t_r jmenovitý převod transformátoru, při kterém se přepínač odboček nachází v základní poloze.



Obr. 4-2 Schéma soustavy a ekvivalentní náhradní schéma pro síťového napáječe s transformátorem [1]

Ekvivalentní impedanci Z_Q lze považovat za reaktanci, tj. $Z_Q = 0 + jX_Q$ pro napáječe s jmenovitým napětím nad 35 kV napájených z venkovních vedení. V jiných situacích, jestliže není pro rezistance R_Q síťových napáječů známa žádná přesná hodnota, je možné dosadit $R_Q = 0,1 X_Q$ kde $X_Q = 0,995 Z_Q$.

Provozovatel přenosové (distribuční) soustavy musí udat počáteční souměrné rázové zkratové proudy I_{kQmax}'' a I_{kQmin}'' na straně vyššího napětí transformátoru.

4.2 Transformátory

4.2.1 Dvouvinut'ové transformátory

V případě dvouvinut'ových transformátorů s odbočkami regulovatelnými při zatížení nebo bez nich lze vypočítat sousledné zkratové impedance $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$ ze jmenovitých údajů transformátoru následovně:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (4.4)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (4.5)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (4.6)$$

kde

U_{rT} je jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí;

I_{rT} jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí;

S_{rT} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru;

P_{krT} jmenovité ztráty nakrátko transformátoru;

u_{kr} jmenovité napětí nakrátko v procentech;

u_{Rr} činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech.

Činnou složku u_{Rr} lze vypočítat ze ztrát nakrátko P_{krT} ve vinutí při jmenovitém proudu I_{rT} .

Poměr R_T/X_T se zpravidla zvětšuje s velikostí transformátoru. Konkrétně u velkých transformátorů je odpor velmi malý, že je možné při výpočtu velikost zkratového proudu předpokládat, že impedanci představuje pouze reaktance. Při výpočtu nárazového zkratového proudu i_p nebo stejnosměrné složky $i_{d.c.}$ je nezbytné uvažovat s odporem. Potřebné údaje pro výpočet lze najít na štítku.

Transformátor spojující dvě nebo více sítí s rozdílným napětím se nazývá síťový transformátor. V případě dvouvinut'ových transformátorů se musí zavést korekční součinitel $K_T: \underline{Z}_{TK} = K_T \underline{Z}_T$ kde $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$.

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} \quad (4.7)$$

kde x_T je poměrná reaktance transformátoru

$$x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT}) \quad (4.8)$$

4.2.2 Trojvinut'ové transformátory

Sousledné zkratové impedance $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B$ a \underline{Z}_C trojvinut'ových transformátorů lze vypočítat podle obrázku 4-3 pomocí tří zkratových impedancí (vztažených na stranu A transformátoru):

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100\%} + j \frac{u_{XrAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{strana C rozpojena}) \quad (4.9)$$

$$\underline{Z}_{AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100\%} + j \frac{u_{XrAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{strana B rozpojena}) \quad (4.10)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100\%} + j \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{strana A rozpojena}) \quad (4.11)$$

S

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (4.12)$$

pomocí vzorců:

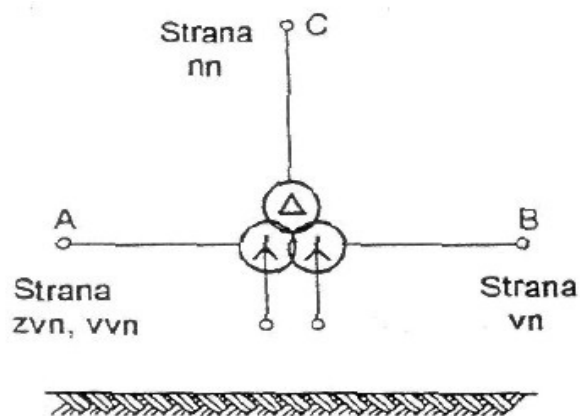
$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad (4.13)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad (4.14)$$

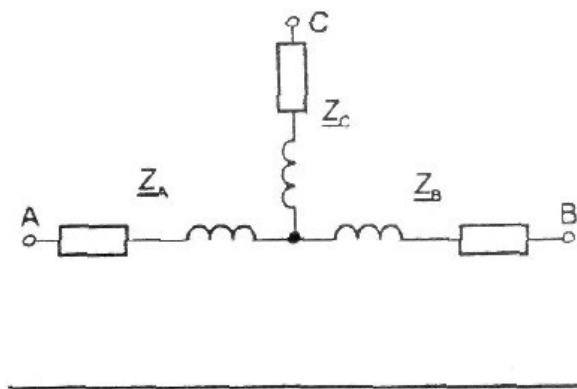
$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \quad (4.15)$$

kde

U_{rTA}	je	jmenovité napětí na straně A;
S_{rTAB}		jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a B;
S_{rTAC}		jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a C;
S_{rTBC}		jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami B a C;
u_{RrAB}, u_{XrAB}	jsou	jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami A a B;
u_{RrAC}, u_{XrAC}		jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami A a C;
u_{RrBC}, u_{XrBC}		jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami B a C;



Obr. 4-3a Označení zapojení vinutí [1]



Obr. 4-3b Náhradní schéma (sousedné složkové soustavy) [1]

Obr. 4-3 Trojvinutový transformátor [1]

Netočivé impedance lze získat od výrobce v případě trojvinutových transformátorů

U trojvinutových transformátorů se tři impedanční korekční součinitele určují použitím poměrných hodnot reaktancí transformátorů.

$$K_{TAB} = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} \quad (4.16)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} \quad (4.17)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} \quad (4.18)$$

Pro zpětnou a netočivou soustavu se použijí tři impedanční korekční součinitele. V situaci impedance mezi uzlem a zemí se určí bez korekčního součinitele.

4.3 Venkovní vedení a kabely

Sousledná zkratová impedance $Z_L = R_L + jX_L$ se vypočítá z parametrů vodiče, jako jsou průřezy a rozteče vodičů. Složky sousledných a netočivých impedancí lze určit měřením. Jednotlivé impedance R_L a X_L kabelů závisí na pracovních postupech a normách jednotlivých států a mohou se vzít z údajů od výrobce nebo z příruček.

Z jmenovitého průřezu q_n a rezistivity ρ lze vypočítat R'_L (činná rezistance na jednotku délky) venkovních vedení při teplotě vodiče 20°C:

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (4.19)$$

Pro rezistivitu platí:

$$\text{Měď} \quad \rho = \frac{1}{54} \left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$$

$$\text{Hliník} \quad \rho = \frac{1}{34} \left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$$

$$\text{Slitina hliníku} \quad \rho = \frac{1}{31} \left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$$

X'_L (reaktance na jednotku délky) pro venkovní vedení lze vypočítat za předpokladu, že je provedena transpozice vedení ze vztahu:

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f\mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (4.20)$$

kde

d je $\sqrt[3]{d_{L1L2}d_{L2L3}d_{L3L1}}$ geometrická střední vzdálenost mezi vodiči či středem svazků;

r poloměr jednoduchého vodiče. V případě svazkových vodičů se za r dosadí $r_B = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$, kde R je poloměr svazku;

n počet vodičů ve svazku (u jednoduchého vodiče $n=1$);

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

4.4 Reaktory omezující zkratový proud

Jestliže je dodržena podmínka geometrické souměrnosti, tak složky sousledné, zpětné a netočivé zkratové impedance jsou stejné. Reaktory omezující zkratový proud se považují za součást zkratové impedance.

$$Z_R = \frac{u_{kR}}{100 \%} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{rR}} \quad \text{a} \quad R_R \ll X_R \quad (4.21)$$

kde

u_{kR} a I_{rR} jsou uvedeny na štítku;

U_n je jmenovité napětí soustavy.

4.5 Synchronní stroje

4.5.1 Synchronní generátory

V soustavách napájených přímo z generátoru bez blokových transformátorů, například v průmyslových sítích nebo nízkonapěťových sítích při výpočtu počátečních souměrných rázových zkratových proudů je nutno použít v sousledné složkové soustavě následující impedanci:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \cdot \underline{Z}_G = K_G \cdot (R_G + jX_d'') \quad (4.22)$$

s korekčním součinitelem:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (4.23)$$

kde

c_{max} je napěťový součinitel (v souladu s tabulkou);

U_n jmenovité napětí soustavy;

U_{rG} jmenovité napětí generátoru;

\underline{Z}_{GK} korigovaná impedance generátoru;

\underline{Z}_G rázová impedance generátoru v sousledné soustavě: $\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$;

φ_{rG} fázový úhel mezi \underline{I}_{rG} a $\underline{U}_{rG} / \sqrt{3}$;

x_d'' poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci:

$$x_d'' = X_d'' / Z_{rG} \text{ kde } Z_{rG} = U_{rG}^2 / S_{rG}$$

Pro fiktivní rezistance R_{Gf} je možno použít následující hodnoty s přijatelnou přesností:

$$R_{Gf} = 0,05 \cdot X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} \geq 100 \text{ MVA,}$$

$$R_{Gf} = 0,07 \cdot X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} < 100 \text{ MVA,}$$

$$R_{Gf} = 0,15 \cdot X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} \leq 1 \text{ 000 V}$$

Součinitele 0,05, 0,07 a 0,15 respektují zanikání střídavé složky zkratového proudu v průběhu první půlperiody po výskytu zkratu. S vlivem různých teplot vinutí na R_{Gf} se neuvažuje.

Pro výpočet nárazového zkratového proudu se mohou použít hodnoty R_{Gf} . Při výpočtu aperiodické složky $i_{d.c.}$ zkratového proudu se zmíněné hodnoty nemohou použít, proto se musí aplikovat pro R_G hodnoty výrobce.

4.5.2 Synchronní kompenzátory a motory

V případě, jestliže se počítá počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' , nárazový zkratový proud i_p , souměrný zkratový vypínací proud I_b a ustálený zkratový proud I_k , tak synchronní kompenzátory jsou modelovány stejným způsobem jako synchronní generátory.

Synchronní motory s napětovou regulací se berou jako synchronní generátory. Pokud synchronní motory nemají napětovou regulaci je nutno použít zvláštní postupy.

4.6 Asynchronní motory

Motory vysokého a nízkého napětí přispívají k počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu I_k'' , k nárazovému zkratovému proudu i_p , k souměrnému zkratovému vypínacímu proudu I_b a při nesouměrných zkratech rovněž k ustálenému zkratovému proudu I_k .

Do výpočtu maximálního zkratového proudu se musí zahrnout příspěvek motorů vysokého napětí. Příspěvek motorů nízkého napětí je nutno zahrnout do výpočtu ve vlastní spotřebě elektráren nebo v průmyslových a podobných rozvodech (např. v sítích chemického a ocelářského průmyslu).

Příspěvek asynchronních motorů v nízkonapětové soustavě ke zkratovému proudu I_k'' je možno zanedbat, pokud zmíněný příspěvek není větší než 5 % počátečního zkratového proudu I_{kM}'' , vypočítaného bez příspěvku těchto motorů.

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 \cdot I_{kM}'' \quad (4.24)$$

kde

$\sum I_{rM}$ je součet jmenovitých proudů motorů připojených přímo (bez transformátorů) k síti s výskytem zkratu;

I_{kM}'' počáteční souměrný rázový zkratový proud bez vlivu motorů.

Při výpočtu zkratových proudů se mohou zanedbat motory vysokého a nízkého napětí, které s ohledem na schéma zapojení (blokování) nebo funkci nejsou zároveň v provozu.

Impedance $Z_M = R_M + jX_M$ asynchronních motorů lze stanovit v sousledné a zpětné složkové soustavě pomocí vztahu:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (4.25)$$

kde

U_{rM} je jmenovité napětí motoru;

I_{rM} jmenovitý proud motoru;

S_{rM} jmenovitý zdánlivý příkon motoru ($S_{rM} = P_{rM} / (\eta_{rM} \cdot \cos \varphi_{rM})$);

I_{LR}/I_{rM} poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu motoru při zabrzděném motoru.

V případě, že je znám R_M/X_M , tak z toho X_M se vypočítá tímto způsobem:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}} \quad (4.26)$$

S přijatelnou přesností se mohou použít následující vztahy:

$R_M/X_M = 0,10$, s $X_M = 0,995 Z_M$ pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů $\geq 1 \text{ MW}$;

$R_M/X_M = 0,15$, s $X_M = 0,989 Z_M$ pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů $< 1 \text{ MW}$;

$R_M/X_M = 0,42$, s $X_M = 0,922 Z_M$ pro skupiny nízkonapěťových motorů včetně připojovacích kabelů.

Jestliže jsou potřebné netočivé impedance soustavy $Z_{(0)M}$ motorů, musí je udat výrobce.

Motory vysokého a nízkého napětí, které jsou připojeny přes dvouvinutové transformátory k síti, kde v nich dochází ke zkratu, lze zanedbat při výpočtu proudů zkratu v místě připojení napáječe Q, v tom případě, že:

$$\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c \cdot 100 \cdot \sum S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I_{kQ}''} - 0,3 \right|} \quad (4.27)$$

kde

$\sum P_{rM}$ je součet jmenovitých činných výkonů uvažovaných motorů vysokého napětí a nízkého napětí;

$\sum S_{rT}$ součet jmenovitých zdánlivých výkonů všech transformátorů, přes které jsou přímo napájeny motory;

I_{kQ}'' počáteční souměrný rázový zkratový proud v místě připojení napáječe Q bez příspěvku motorů;

U_{nQ} jmenovité napětí soustavy v místě připojení napáječe Q.

5. Výpočet zkratových proudů

V případě vzdáleného zkratu se zkratový proud vypočítá sečtením následujících dvou složek:

- střídavé složky s konstantní amplitudou po celou dobu zkratu,
- stejnosměrné složky začínají na počáteční hodnotě A a klesajícím směrem k nule.

V případě blízkého zkratu se zkratový proud vypočítá sečtením následujících dvou složek:

- střídavé složky se zmenšující se amplitudou během zkratu,
- stejnosměrné složky začínající na počáteční hodnotě A a klesající směrem k nule.

Při výpočtu zkratových proudů v soustavách napájených generátory a motory (zkraty elektricky blízké generátoru nebo motoru) je nutno určit tyto parametry:

- počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' .
- nárazový zkratový proud i_p .
- souměrný zkratový vypínací proud I_b .
- ustálený zkratový proud I_k .

Je dovoleno uvažovat $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$ pro výpočet počátečního rázového zkratového proudu.

Typ zkratu, který vede k největšímu zkratovému proudu, stanovují hodnoty sousledných, zpětných a netočivých zkratových impedancí soustavy.

5.1 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''

V častém případě je $\underline{Z}_{(0)}$ větší než $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$, proto se vyskytne největší počáteční zkratový proud u trojfázového zkratu. V případě, kdy je zkrat blízko transformátoru s nízkou netočivou impedancí může být $\underline{Z}_{(0)}$ menší než $\underline{Z}_{(1)}$, z toho důvodu se nejvyšší počáteční zkratový proud I_{kE2E}'' vyskytne u dvoufázového zemního zkratu.

5.1.1 Trojfázový zkrat

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' se vypočítá podle rovnice z napětí ekvivalentního napěťového zdroje $c \cdot U_n / \sqrt{3}$ v místě zkratu a zkratové impedance $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$.

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (5.1)$$

Ekvivalentní zdroj napětí $c \cdot U_n / \sqrt{3}$ se zavádí v místě zkratu se součinitelem c (podle tabulky 3-1).

5.1.2 Dvofázový zkrat

Počáteční rázový zkratový proud se vypočítá následujícím způsobem:

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |\underline{Z}_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_k'' \quad (5.2)$$

Nezávisle na tom, zda jde o blízký zkrat nebo vzdálený zkrat je zpětná impedance přibližně rovna sousledné impedanci v počátečním období zkratu. V případě blízkého zkratu se může zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ lišit od $\underline{Z}_{(1)}$.

5.1.3 Dvofázový zemní zkrat

Při výpočtu počátečního souměrného rázového zkratového proudu je důležité rozlišit proudy I_{k2EL2}'' , I_{k2EL3}'' a I_{kE2E}'' .

$\underline{Z}_{(2)}$ je přibližně rovno $\underline{Z}_{(1)}$ pro vzdálené zkraty. Jestli je $\underline{Z}_{(0)}$ menší než $\underline{Z}_{(2)}$, proud I_{kE2E}'' je největší ze všech počátečních souměrných rázových zkratových proudů I_k'' , I_{k2}'' , I_{k2E}'' a I_{k1}'' při mezifázovém zkratu se zemním spojením.

$$I_{k2EL2}'' = -j \cdot c \cdot U_n \cdot \frac{\underline{Z}_{(0)} - \underline{a} \cdot \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \quad (5.3)$$

$$I_{k2EL3}'' = j \cdot c \cdot U_n \cdot \frac{\underline{Z}_{(0)} - \underline{a}^2 \cdot \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \quad (5.4)$$

$$I_{kE2E}'' = -\frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n \cdot \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \quad (5.5)$$

Pro vzdálený zkrat s $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$ dostaneme velikosti zkratových proudů:

$$I_{k2EL2}'' = c \cdot U_n \cdot \frac{|\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - \underline{a}|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \cdot \underline{Z}_{(0)}|} \quad (5.6)$$

$$I_{k2EL3}'' = c \cdot U_n \cdot \frac{|\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - \underline{a}^2|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \cdot \underline{Z}_{(0)}|} \quad (5.7)$$

$$I_{kE2E}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \cdot \underline{Z}_{(0)}|} \quad (5.8)$$

5.1.4 Jednofázový zkrat

Výpočet počátečního rázového zkratového proudu bude vypadat následovně:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}} \quad (5.9)$$

Pro vzdálený zkrat s $Z_{(2)} = Z_{(1)}$ se absolutní hodnota vypočítá tímto způsobem:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|2 \cdot Z_{(1)} + Z_{(0)}|} \quad (5.10)$$

V případě, že je $Z_{(0)}$ menší než $Z_{(2)} = Z_{(1)}$ je počáteční rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu I_{k1}'' větší než trojfázový zkratový proud I_k'' , ale menší než I_{kE2E}'' .

5.2 Nárazový zkratový proud i_p

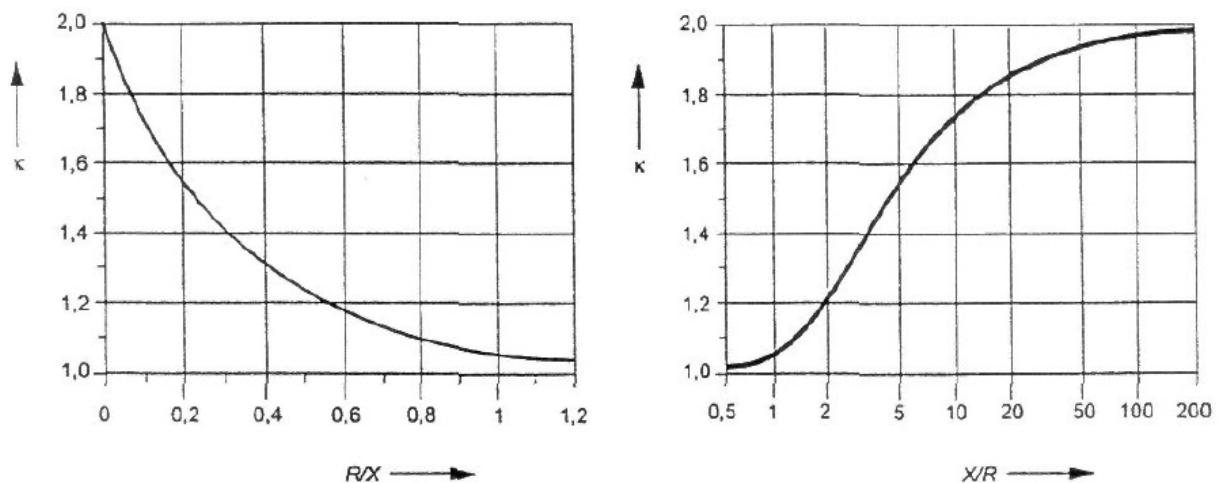
5.2.1 Trojfázový zkrat

U trojfázových zkratů se příspěvek nárazového zkratového proudu vypočítá:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (5.11)$$

Součinitel κ pro poměr R/X nebo X/R se stanoví z obr. 5-1 nebo lze ho vypočítat pomocí vztahu:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 R/X} \quad (5.12)$$



Obr. 5-1 Součinitel κ pro sériové obvody jako funkce poměru R/X nebo X/R [1]

5.2.2 Dvufázový zkrat

K výpočtu nárazového zkratového proudu lze použít vztah:

$$i_{p2} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2}'' \quad (5.13)$$

K úpravě lze využít stejné hodnoty κ jako tomu bylo pro trojfázový zkrat. V případě, jestli platí vztah $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$, tak při dvoufázovém zkratu je nárazový zkratový proud i_{p2} menší než trojfázový nárazový zkratový proud i_p :

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_p \quad (5.14)$$

5.2.3 Dvoufázový zemní zkrat

Nárazový zkratový proud pro dvoufázový zemní zkrat se vypočítá následovně:

$$i_{p2E} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2E}'' \quad (5.15)$$

Opět k úpravě lze využít stejné hodnoty κ jako tomu bylo pro trojfázový zkrat. Pokud je $\underline{Z}_{(0)}$ o hodně menší než $\underline{Z}_{(1)}$ je nutné vypočítat i_{p2E} , v ostatních případech nemusíme počítat i_{p2E} .

5.2.4 Jednofázový zkrat

Nárazový zkratový proud pro výpočet bude mít tento tvar:

$$i_{p1} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k1}'' \quad (5.16)$$

U jednofázového zkratu, lze také k úpravě využít stejné hodnoty κ jako tomu bylo pro trojfázový zkrat.

5.3 Stejnoseměrná složka zkratového proudu

Stejnoseměrnou složku $i_{d.c.}$ zkratového proudu je možno vypočítat s dostatečnou přesností následujícím způsobem:

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \cdot R/X} \quad (5.17)$$

kde

I_k'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud;

f jmenovitý kmitočet;

t čas;

R/X poměr rezistance k reaktanci.

5.4 Souměrný vypínací zkratový proud I_b

Vypínací zkratový proud v místě zkratu je tvořen dvěma hodnotami:

- symetrického zkratového proudu I_b .
- stejnosměrné složky zkratového proudu $i_{d.c.}$ v čase t_{min} podle rovnice 5.17.

5.4.1 Vzdálený zkrat

U vzdálených zkratů se zkratové souměrné vypínací proudy rovnají počátečním rázovým zkratovým proudům:

$$I_b = I_k'' \quad (5.18)$$

$$I_{b2} = I_{k2}'' \quad (5.19)$$

$$I_{b2E} = I_{k2E}'' \quad (5.20)$$

$$I_{b1} = I_{k1}'' \quad (5.21)$$

5.4.2 Blízký zkrat

V případě jednoduchého napájení zkratu se zmenšování souměrného zkratového vypínacího proudu zohledňuje za pomoci součinitele μ .

$$I_b = \mu \cdot I_k'' \quad (5.22)$$

Součinitel μ závisí na minimální době vypnutí t_{min} a poměru I_{kG}''/I_{rG} , jestliže tento poměr I_{kG}''/I_{rG} není větší než 2, platí že $\mu = 1$ pro všechny hodnoty minimální doby vypnutí t_{min} .

kde

I_{rG} je jmenovitý proud generátoru.

Součinitel μ pro jednotlivé doby vypnutí:

$$\mu = 0,84 + 0,26 \cdot e^{-0,26 I_{kG}''/I_{rG}} \quad \text{pro } t_{min} = 0,02 \text{ s} \quad (5.23)$$

$$\mu = 0,71 + 0,51 \cdot e^{-0,30 I_{kG}''/I_{rG}} \quad \text{pro } t_{min} = 0,05 \text{ s} \quad (5.24)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 I_{kG}''/I_{rG}} \quad \text{pro } t_{min} = 0,10 \text{ s} \quad (5.25)$$

$$\mu = 0,56 + 0,94 \cdot e^{-0,38 I_{kG}''/I_{rG}} \quad \text{pro } t_{min} \geq 0,25 \text{ s} \quad (5.26)$$

5.4.3 Nesouměrné zkraty

U nesouměrných zkratových proudů se nebere v potaz pokles magnetického toku v generátoru a aplikují se tyto rovnice (5.19) až (5.21).

5.5 Ustálený zkratový proud I_k

Postup výpočtu ustáleného zkratového proudu I_k je méně přesný než, při aplikování výpočtu počátečního rázového zkratového proudu I_k'' .

5.5.1 Maximální ustálený zkratový proud

Pro výpočet maximálního ustáleného zkratového proudu se počítá s maximálním buzením synchronního generátoru:

$$I_{kmax} = \lambda_{max} \cdot I_{rG} \quad (5.27)$$

Součinitel λ_{max} je přesněji popsán v ČSN EN 60909-0.

5.5.2 Minimální ustálený zkratový proud

Pro výpočet minimálního ustáleného zkratového proudu se počítá s konstantním buzením nezátíženého synchronního stroje:

$$I_{kmin} = \lambda_{min} \cdot I_{rG} \quad (5.28)$$

Součinitel λ_{min} je přesněji popsán v ČSN EN 60909-0.

5.6 Jouleův integrál a ekvivalentní oteplovací zkratový proud

Integrál $\int i^2 dt$ stanovuje energii, která se vytvoří v odporovém prvku soustavy průchodem zkratového proudu. V normě je vypočítaná energie za použití součinitele m pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu a současně součinitele n pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu.

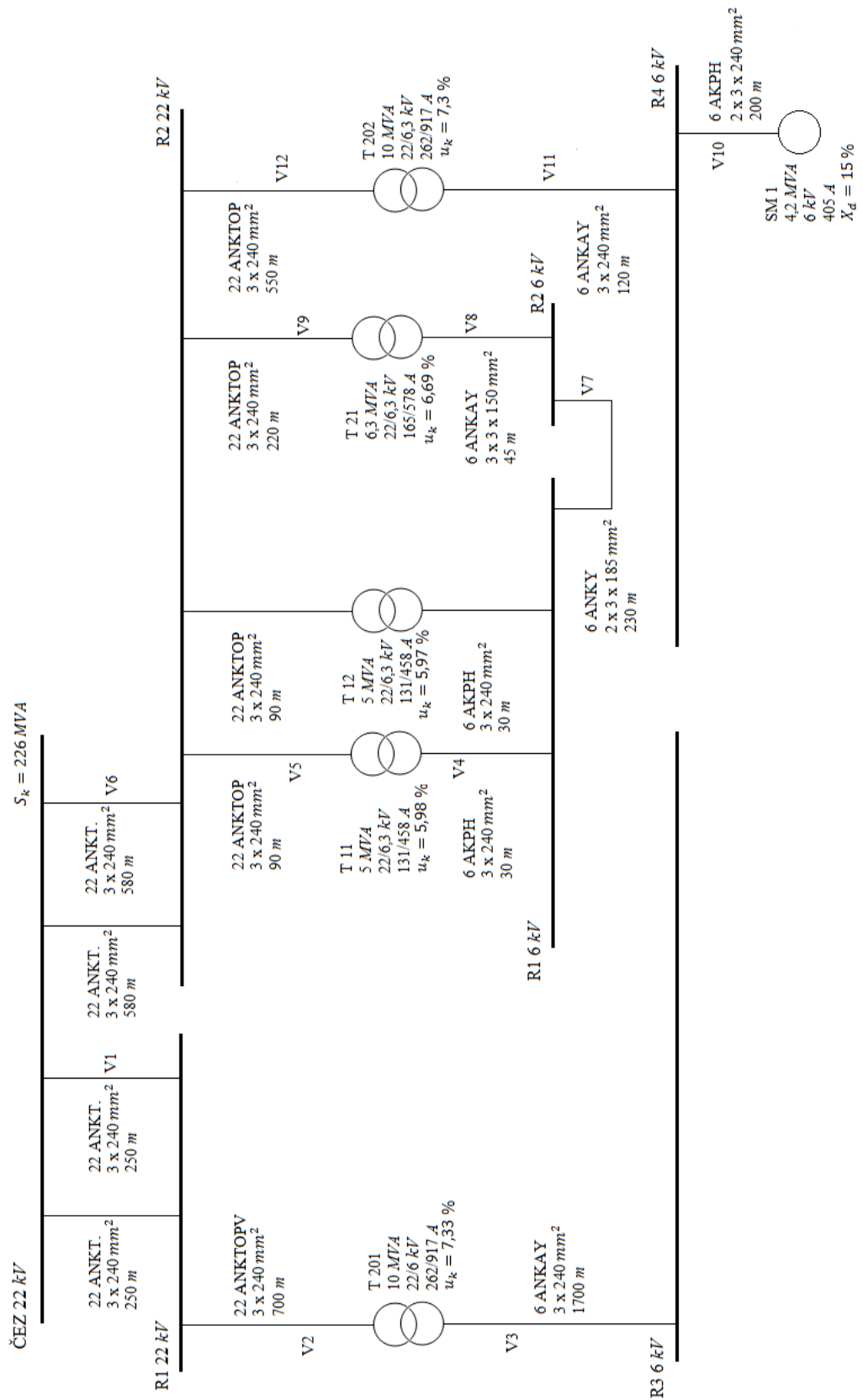
$$\int_0^{T_k} i^2 dt = i_k''^2 \cdot (m + n) \cdot T_k = I_{th}^2 \cdot T_k \quad (5.29)$$

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud se vypočítá následujícím vztahem:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (5.30)$$

Jouleův integrál a ekvivalentní oteplovací zkratový proud se mají udávat s dobou trvání zkratu, se kterým jsou spojeny. V případě vzdálených zkratů se jmenovitou dobou trvání zkratu 0,5 s nebo větší je dovolené uvažovat s $m + n = 1$. Pro distribuční sítě (u elektrických vzdálených zkratů) se může použít $n = 1$.

6. Výpočet zkratových poměrů na rozvodnách průmyslového podniku



Obr. 6-1 Schéma napájení rozveden průmyslového podniku

Zvolené hodnoty průmyslového podniku:

Maximální zkratový výkon rozvodny ČEZ 22 kV:

$$S_k = 226 \text{ MVA}$$

Vztažný výkon:

$$S_v = 900 \text{ MVA}$$

Parametry jednotlivých prvků průmyslového podniku:**Tab. 6-1 Zvolené hodnoty synchronního motoru**

	S_n (MVA)	U_n (kV)	I (A)	x_d'' (%)
SM 1	4,2	6	405	15

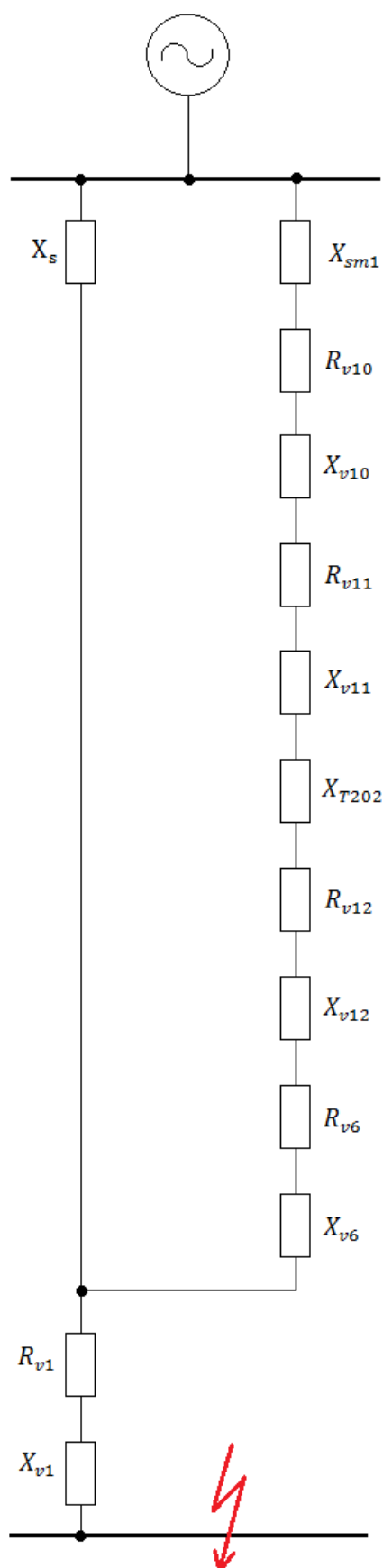
Tab. 6-2 Zvolené hodnoty jednotlivých transformátorů

	S_T (MVA)	U (kV)	I (A)	u_k (%)
T 11	5	22/6,3	131/458	5,98
T 12	5	22/6,3	131/458	5,97
T 21	6,3	22/6,3	165/578	6,69
T 201	10	22/6	262/917	7,33
T 202	10	22/6,3	262/917	7,3

Tab. 6-3 Zvolené hodnoty kabelových vedení

	l (m)	S (mm ²)	Typ	R_k (Ω·km ⁻¹)	X_k (Ω·km ⁻¹)
V1	250	2 x 3 x 240 mm ²	22 ANKT.	0,149	0,088
V2	700	3 x 240 mm ²	22 ANKTOPV	0,149	0,088
V3	1700	3 x 240 mm ²	6 ANKAY	0,149	0,078
V4	30	2 x 3 x 240 mm ²	6 AKPH	0,149	0,078
V5	90	2 x 3 x 240 mm ²	22 ANKTOP	0,149	0,088
V6	580	2 x 3 x 240 mm ²	22 ANKT.	0,149	0,088
V7	230	2 x 3 x 185 mm ²	6 ANKY	0,194	0,078
V8	45	3 x 3 x 150 mm ²	6 ANKAY	0,239	0,078
V9	220	3 x 240 mm ²	22 ANKTOP	0,149	0,088
V10	200	2 x 3 x 240 mm ²	6 AKPH	0,149	0,078
V11	120	3 x 240 mm ²	6 ANKAY	0,149	0,078
V12	550	3 x 240 mm ²	22 ANKTOP	0,149	0,088

6.1 Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R1 22 kV



Obr. 6-2 Náhradní schéma pro zkrat v rozvodně R1 22 kV

Reaktance soustavy:

$$X_s = \frac{c \cdot S_v}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 900 \cdot 10^6}{226 \cdot 10^6} = 4,38$$

Reaktance synchronního motoru:

$$X_{sm1} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{S_{M1}} = \frac{0,15 \cdot 900 \cdot 10^6}{4,2 \cdot 10^6} = 32,14$$

Reaktance transformátoru:

$$X_{T202} = \frac{u_{kT202}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T202}} = \frac{7,3}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 6,57$$

Činný odpor a induktivní reaktance V1:

$$R_{v1} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,25}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,035$$

$$X_{v1} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,25}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,02$$

Činný odpor a induktivní reaktance V6:

$$R_{v6} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,580}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,08$$

$$X_{v6} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,580}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,047$$

Činný odpor a induktivní reaktance V10:

$$R_{v10} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,37$$

$$X_{v10} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,195$$

Činný odpor a induktivní reaktance V11:

$$R_{v11} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,12 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,447$$

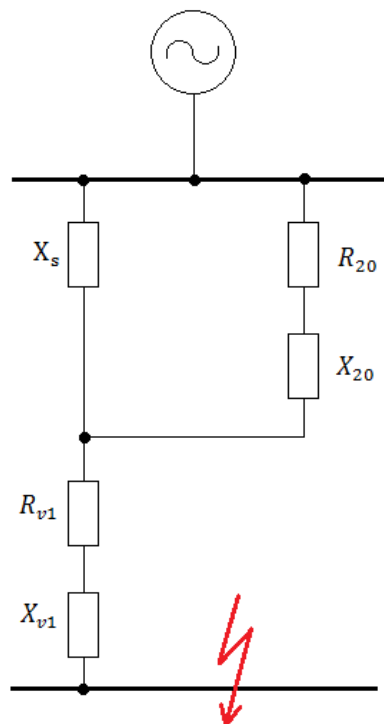
$$X_{v11} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 0,12 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,234$$

Činný odpor a induktivní reaktance V12:

$$R_{v12} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,55 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,152$$

$$X_{v12} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,55 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,09$$

Postupné zjednodušování:

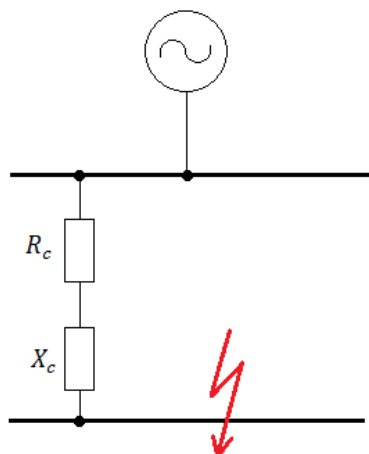


Obr. 6-3 Zjednodušení náhradního schéma R1 22 kV

$$R_{20} = R_{v10} + R_{v11} + R_{v12} + R_{v6} = 0,37 + 0,447 + 0,152 + 0,08 = 1,049$$

$$X_{20} = X_{sm1} + X_{v10} + X_{v11} + X_{T202} + X_{v12} + X_{v6}$$

$$= 32,14 + 0,195 + 0,234 + 6,57 + 0,09 + 0,047 = 39,276$$



Obr. 6-4 Výsledné Zjednodušení náhradního schéma R1 22 kV

Výsledná celková impedance zkratového obvodu:

$$Z_c = \frac{j \cdot X_s \cdot (R_{20} + j \cdot X_{20})}{j \cdot X_s + (R_{20} + j \cdot X_{20})} + R_{v1} + X_{v1}$$
$$= \frac{j \cdot 4,38 \cdot (1,049 + j \cdot 39,276)}{j \cdot 4,38 + (1,049 + j \cdot 39,276)} + 0,035 + j \cdot 0,02 = 0,0456 + j \cdot 3,961$$

$$R_c = 0,0456$$

$$X_c = 3,961$$

Absolutní hodnota výsledné impedance:

$$|Z_c| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{0,0456^2 + 3,961^2} = 3,961$$

Vztažný proud:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{900 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 23,619 \text{ kA}$$

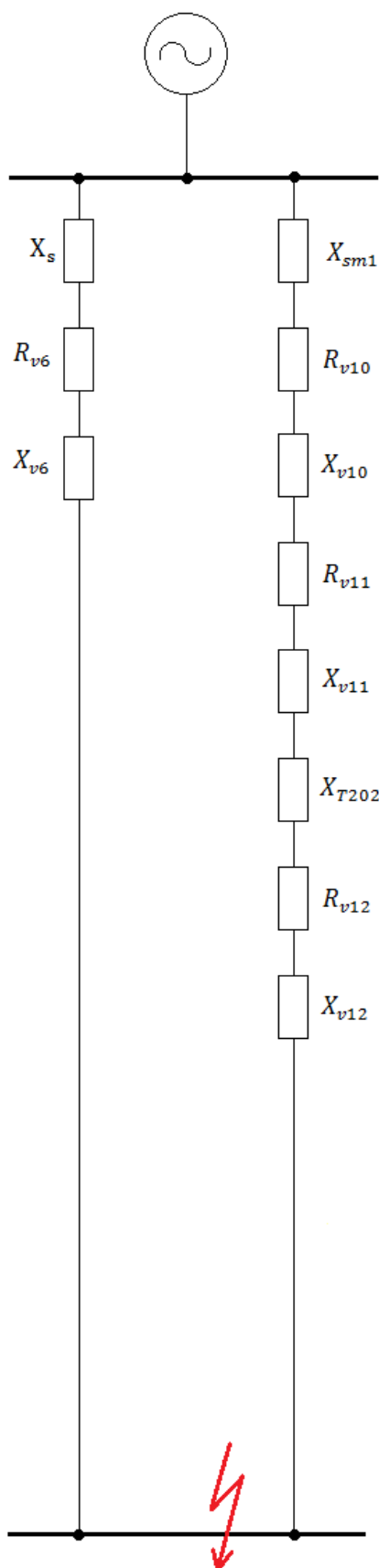
Počáteční souměrný rázový zkratový proud:

$$I_k'' = \frac{c \cdot I_v}{|Z_c|} = \frac{1,1 \cdot 23,619 \cdot 10^3}{3,961} = 6,559 \text{ kA}$$

Zkratový výkon:

$$S_k = \frac{c \cdot S_v}{|Z_c|} = \frac{1,1 \cdot 900 \cdot 10^6}{3,961} = 249,94 \text{ MVA}$$

6.2 Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R2 22 kV



Obr. 6-5 Náhradní schéma pro zkrat v rozvodně R2 22 kV

Reaktance soustavy:

$$X_s = \frac{c \cdot S_v}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 900 \cdot 10^6}{226 \cdot 10^6} = 4,38$$

Reaktance synchronního motoru:

$$X_{sm1} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{S_{M1}} = \frac{0,15 \cdot 900 \cdot 10^6}{4,2 \cdot 10^6} = 32,14$$

Reaktance transformátoru:

$$X_{T202} = \frac{u_{kT202}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T202}} = \frac{7,3}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 6,57$$

Činný odpor a induktivní reaktance V6:

$$R_{v6} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,580}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,08$$

$$X_{v6} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,580}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,047$$

Činný odpor a induktivní reaktance V10:

$$R_{v10} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,37$$

$$X_{v10} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,195$$

Činný odpor a induktivní reaktance V11:

$$R_{v11} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,12 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,447$$

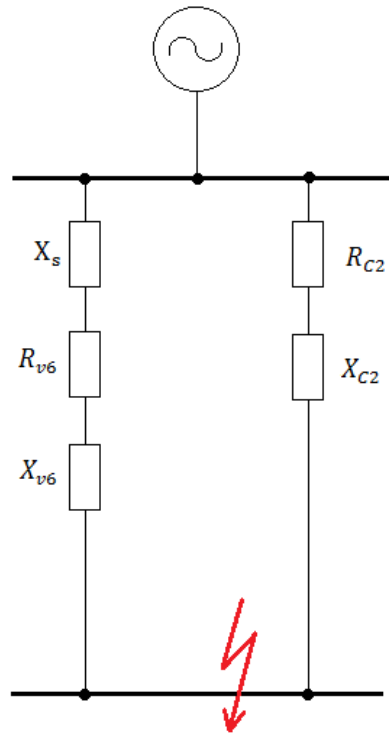
$$X_{v11} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 0,12 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,234$$

Činný odpor a induktivní reaktance V12:

$$R_{v12} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,55 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,152$$

$$X_{v12} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,55 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,09$$

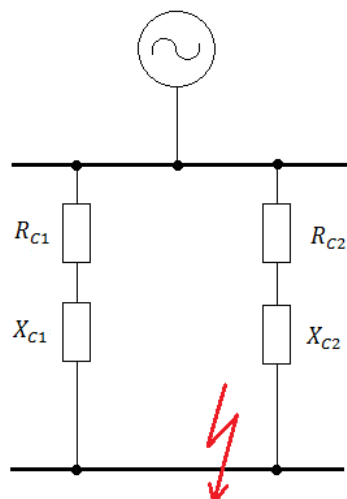
Postupné zjednodušování:



Obr. 6-6 Zjednodušení náhradního schéma R2 22 kV

$$R_{C2} = R_{v10} + R_{v11} + R_{v12} = 0,37 + 0,447 + 0,152 = 0,969$$

$$X_{C2} = X_{sm1} + X_{v10} + X_{v11} + X_{T202} + X_{v12} = 32,14 + 0,195 + 0,234 + 6,57 + 0,09 \\ = 39,229$$



Obr. 6-7 Výsledné zjednodušení náhradního schéma R2 22 kV

$$R_{C1} = R_{v6} = 0,08$$

$$X_{C1} = X_s + X_{v6} = 4,38 + 0,047 = 4,427$$

Celková impedance jednotlivých paralelních větví:

$$Z_{C1} = R_{C1} + j \cdot X_{C1} = 0,08 + j \cdot 4,427$$

$$Z_{C2} = R_{C2} + j \cdot X_{C2} = 0,969 + j \cdot 39,229$$

Výsledná celková impedance zkratového obvodu:

$$Z_c = \frac{1}{\frac{1}{Z_{C1}} + \frac{1}{Z_{C2}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,08 + j \cdot 4,427} + \frac{1}{0,969 + j \cdot 39,229}} = 0,075 + j \cdot 3,978$$

Absolutní hodnota výsledné impedance:

$$|Z_c| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{0,075^2 + 3,978^2} = 3,98$$

Vztažný proud:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{900 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 23,619 \text{ kA}$$

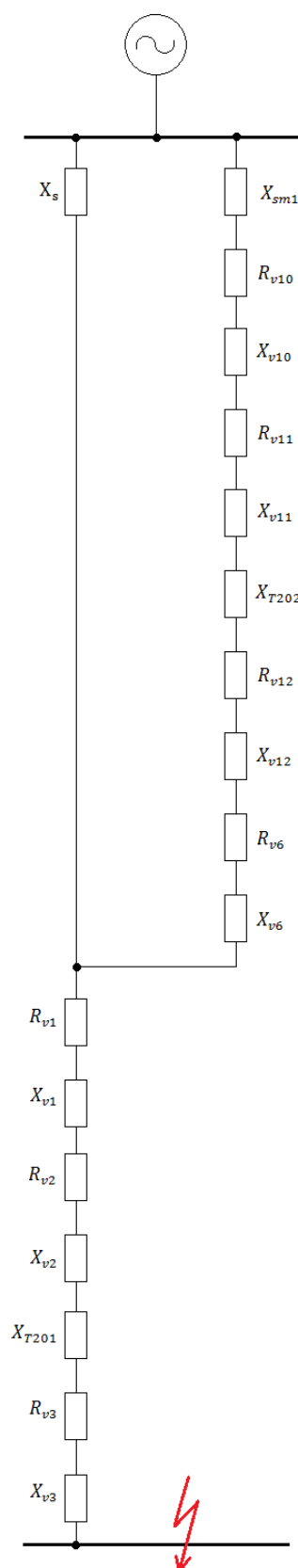
Počáteční souměrný rázový zkratový proud:

$$I_k'' = \frac{c \cdot I_v}{|Z_c|} = \frac{1,1 \cdot 23,619 \cdot 10^3}{3,98} = 6,528 \text{ kA}$$

Zkratový výkon:

$$S_k = \frac{c \cdot S_v}{|Z_c|} = \frac{1,1 \cdot 900 \cdot 10^6}{3,98} = 248,74 \text{ MVA}$$

6.3 Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R3 6 kV



Obr. 6-8 Náhradní schéma pro zkrat v rozvodně R3 6 kV

Reaktance soustavy:

$$X_s = \frac{c \cdot S_v}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 900 \cdot 10^6}{226 \cdot 10^6} = 4,38$$

Reaktance synchronního motoru:

$$X_{sm1} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{S_{M1}} = \frac{0,15 \cdot 900 \cdot 10^6}{4,2 \cdot 10^6} = 32,14$$

Reaktance transformátorů:

$$X_{T201} = \frac{u_{kT201}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T201}} = \frac{7,33}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 6,597$$

$$X_{T202} = \frac{u_{kT202}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T202}} = \frac{7,3}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 6,57$$

Činný odpor a induktivní reaktance V1:

$$R_{v1} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,25}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,035$$

$$X_{v1} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,25}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,02$$

Činný odpor a induktivní reaktance V2:

$$R_{v2} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,7 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,194$$

$$X_{v2} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,7 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,115$$

Činný odpor a induktivní reaktance V3:

$$R_{v3} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 1,7 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 6,333$$

$$X_{v3} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 1,7 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 3,315$$

Činný odpor a induktivní reaktance V6:

$$R_{v6} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,580}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,08$$

$$X_{v6} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,580}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,047$$

Činný odpor a induktivní reaktance V10:

$$R_{v10} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,37$$

$$X_{v10} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,195$$

Činný odpor a induktivní reaktance V11:

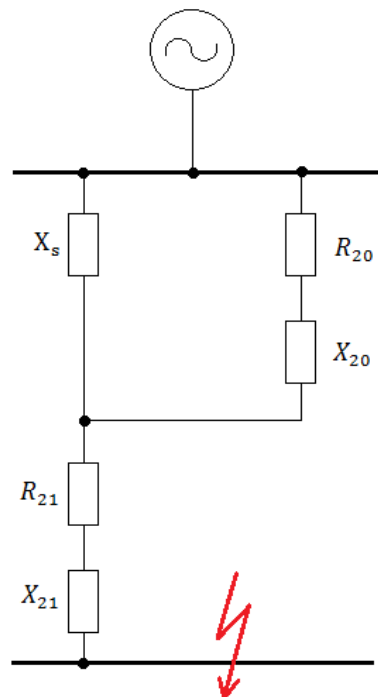
$$R_{v11} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,12 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,447$$

$$X_{v11} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 0,12 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,234$$

Činný odpor a induktivní reaktance V12:

$$R_{v12} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,55 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,152$$

$$X_{v12} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,55 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,09$$

**Obr. 6-9 Zjednodušení náhradního schéma R3 6 kV**

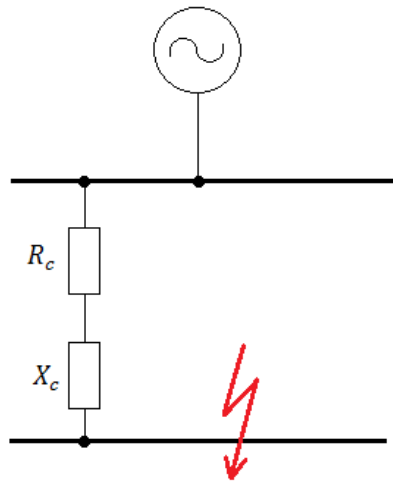
$$R_{20} = R_{v10} + R_{v11} + R_{v12} + R_{v6} = 0,37 + 0,447 + 0,152 + 0,08 = 1,049$$

$$X_{20} = X_{sm1} + X_{v10} + X_{v11} + X_{T202} + X_{v12} + X_{v6}$$

$$= 32,14 + 0,195 + 0,234 + 6,57 + 0,09 + 0,047 = 39,276$$

$$R_{21} = R_{v1} + R_{v2} + R_{v3} = 0,035 + 0,194 + 6,333 = 6,562$$

$$X_{21} = X_{v1} + X_{v2} + X_{T201} + X_{v3} = 0,02 + 0,115 + 6,597 + 3,315 = 10,047$$



Obr. 6-10 Výsledné zjednodušení náhradního schéma R3 6 kV

Výsledná celková impedance zkratového obvodu:

$$\begin{aligned} Z_c &= \frac{j \cdot X_s \cdot (R_{20} + j \cdot X_{20})}{j \cdot X_s + (R_{20} + j \cdot X_{20})} + R_{v21} + X_{v21} \\ &= \frac{j \cdot 4,38 \cdot (1,049 + j \cdot 39,276)}{j \cdot 4,38 + (1,049 + j \cdot 39,276)} + 6,562 + 10,047 = 6,573 + j \cdot 13,99 \end{aligned}$$

$$R_c = 6,573$$

$$X_c = 13,99$$

Absolutní hodnota výsledné impedance:

$$|Z_c| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{6,573^2 + 13,99^2} = 15,46$$

Vztažný proud:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{900 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 86,603 \text{ kA}$$

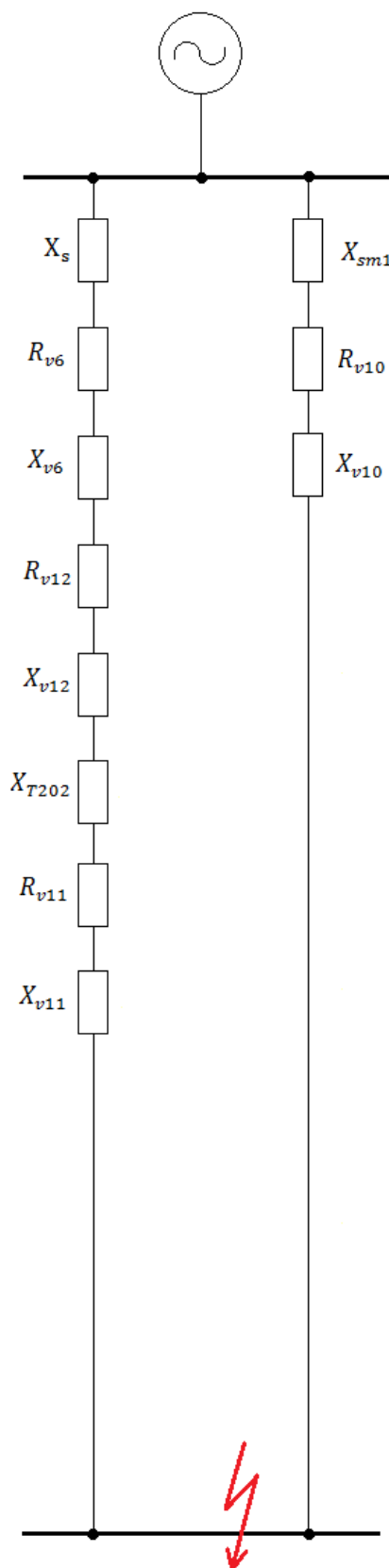
Počáteční souměrný rázový zkratový proud:

$$I_k'' = \frac{c \cdot I_v}{|Z_c|} = \frac{1,1 \cdot 86,603 \cdot 10^3}{15,46} = 6,162 \text{ kA}$$

Zkratový výkon:

$$S_k = \frac{c \cdot S_v}{|Z_c|} = \frac{1,1 \cdot 900 \cdot 10^6}{15,46} = 64,036 \text{ MVA}$$

6.4 Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R4 6 kV



Obr. 6-11 Náhradní schéma pro zkrat v rozvodně R4 6 kV

Reaktance soustavy:

$$X_s = \frac{c \cdot S_v}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 900 \cdot 10^6}{226 \cdot 10^6} = 4,38$$

Reaktance synchronního motoru:

$$X_{sm1} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{S_{M1}} = \frac{0,15 \cdot 900 \cdot 10^6}{4,2 \cdot 10^6} = 32,14$$

Reaktance transformátoru:

$$X_{T202} = \frac{u_{kT202}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T202}} = \frac{7,3}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 6,57$$

Činný odpor a induktivní reaktance V6:

$$R_{v6} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,580}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,08$$

$$X_{v6} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,580}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,047$$

Činný odpor a induktivní reaktance V10:

$$R_{v10} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,37$$

$$X_{v10} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,195$$

Činný odpor a induktivní reaktance V11:

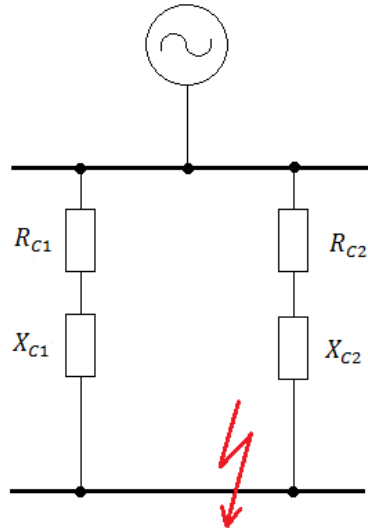
$$R_{v11} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,12 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,447$$

$$X_{v11} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 0,12 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,234$$

Činný odpor a induktivní reaktance V12:

$$R_{v12} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,55 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,152$$

$$X_{v12} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,55 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,09$$



Obr. 6-12 Výsledné zjednodušení náhradního schéma R4 6 kV

$$R_{C1} = R_{v6} + R_{v11} + R_{v12} = 0,08 + 0,447 + 0,152 = 0,679$$

$$X_{C1} = X_s + X_{v6} + X_{T202} + X_{v11} + X_{v12} = 4,38 + 0,047 + 6,57 + 0,234 + 0,09 = 11,321$$

$$R_{C2} = R_{v10} = 0,37$$

$$X_{C2} = X_{sm1} + X_{v10} = 32,14 + 0,195 = 32,335$$

Celková impedance jednotlivých paralelních větví:

$$Z_{C1} = R_{C1} + j \cdot X_{C1} = 0,679 + j \cdot 11,321$$

$$Z_{C2} = R_{C2} + j \cdot X_{C2} = 0,37 + j \cdot 32,335$$

Výsledná celková impedance zkratového obvodu:

$$Z_c = \frac{1}{\frac{1}{Z_{C1}} + \frac{1}{Z_{C2}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,679 + j \cdot 11,321} + \frac{1}{0,37 + j \cdot 32,335}} = 0,397 + j \cdot 8,389$$

Absolutní hodnota výsledné impedance:

$$|Z_c| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{0,397^2 + 8,389^2} = 8,398$$

Vztažený proud:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{900 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 86,603 \text{ kA}$$

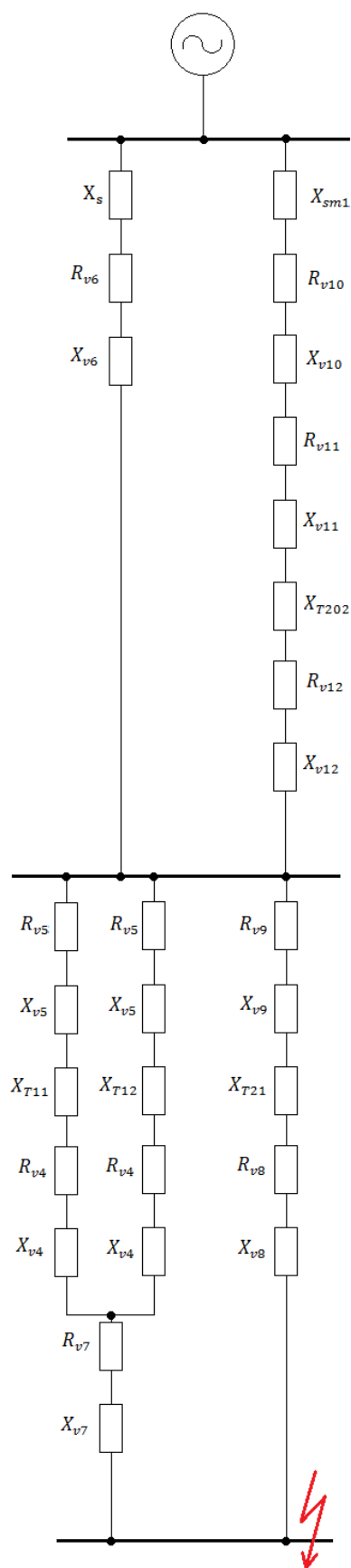
Počáteční souměrný rázový zkratový proud:

$$I_k'' = \frac{c \cdot I_v}{|Z_c|} = \frac{1,1 \cdot 86,603 \cdot 10^3}{8,398} = 11,344 \text{ kA}$$

Zkratový výkon:

$$S_k = \frac{c \cdot S_v}{|Z_c|} = \frac{1,1 \cdot 900 \cdot 10^6}{8,398} = 117,885 \text{ MVA}$$

6.5 Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R2 6 kV



Obr. 6-13 Náhradní schéma pro zkrat v rozvodně R2 6 kV

Reaktance soustavy:

$$X_s = \frac{c \cdot S_v}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 900 \cdot 10^6}{226 \cdot 10^6} = 4,38$$

Reaktance synchronního motoru:

$$X_{sm1} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{S_{M1}} = \frac{0,15 \cdot 900 \cdot 10^6}{4,2 \cdot 10^6} = 32,14$$

Reaktance transformátorů:

$$X_{T11} = \frac{u_{kT11}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T11}} = \frac{5,98}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} = 10,764$$

$$X_{T12} = \frac{u_{kT12}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T12}} = \frac{5,97}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} = 10,764$$

$$X_{T21} = \frac{u_{kT21}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T21}} = \frac{6,69}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{6,3 \cdot 10^6} = 9,557$$

$$X_{T202} = \frac{u_{kT202}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T202}} = \frac{7,3}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 6,57$$

Činný odpor a induktivní reaktance V4:

$$R_{v4} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,03}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0559$$

$$X_{v4} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,03}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0293$$

Činný odpor a induktivní reaktance V5:

$$R_{v5} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,09}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,0125$$

$$X_{v5} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,09}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 7,36 \cdot 10^{-3}$$

Činný odpor a induktivní reaktance V6:

$$R_{v6} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,580}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,08$$

$$X_{v6} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,580}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,047$$

Činný odpor a induktivní reaktance V7:

$$R_{v7} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,194 \cdot 0,230}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,558$$

$$X_{v7} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,230}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,224$$

Činný odpor a induktivní reaktance V8:

$$R_{v8} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,239 \cdot 0,045}{3} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0896$$

$$X_{v8} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,045}{3} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0293$$

Činný odpor a induktivní reaktance V9:

$$R_{v9} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,220 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,061$$

$$X_{v9} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,220 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,036$$

Činný odpor a induktivní reaktance V10:

$$R_{v10} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,37$$

$$X_{v10} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,195$$

Činný odpor a induktivní reaktance V11:

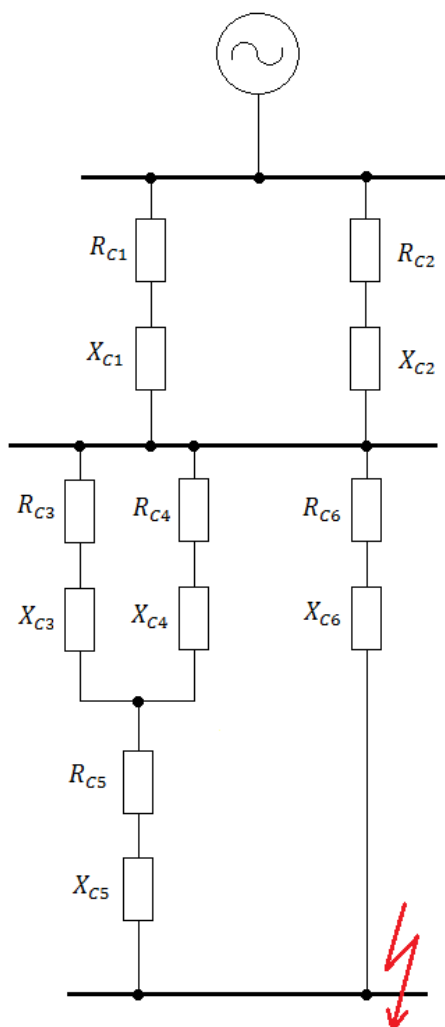
$$R_{v11} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,12 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,447$$

$$X_{v11} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 0,12 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,234$$

Činný odpor a induktivní reaktance V12:

$$R_{v12} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,55 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,152$$

$$X_{v12} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,55 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,09$$



Obr. 6-14 Zjednodušení náhradního schéma R2 6 kV

$$R_{C1} = R_{v6} = 0,08$$

$$X_{C1} = X_s + X_{v6} = 4,38 + 0,047 = 4,427$$

$$R_{C2} = R_{v10} + R_{v11} + R_{v12} = 0,37 + 0,447 + 0,152 = 0,969$$

$$X_{C2} = X_{sm1} + X_{v10} + X_{v11} + X_{T202} + X_{v12} = 32,14 + 0,195 + 0,234 + 6,57 + 0,09 = 39,229$$

$$R_{C3} = R_{v5} + R_{v4} = 0,0125 + 0,0559 = 0,0684$$

$$X_{C3} = X_{v5} + X_{T11} + X_{v4} = 7,36 \cdot 10^{-3} + 10,764 + 0,0293 = 10,801$$

$$R_{C4} = R_{v5} + R_{v4} = 0,0125 + 0,0559 = 0,0684$$

$$X_{C4} = X_{v5} + X_{T12} + X_{v4} = 7,36 \cdot 10^{-3} + 10,764 + 0,0293 = 10,801$$

$$R_{C5} = R_{v7} = 0,558$$

$$X_{C5} = X_{v7} = 0,224$$

$$Z_{C5} = 0,558 + j \cdot 0,224$$

$$R_{C6} = R_{v9} + R_{v8} = 0,061 + 0,0896 = 0,1506$$

$$X_{C6} = X_{v9} + X_{T21} + X_{v8} = 0,036 + 9,557 + 0,0293 = 9,62$$

$$Z_{C6} = 0,1506 + j \cdot 9,62$$

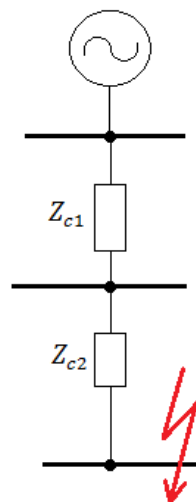
$$Z_{C34} = \frac{(R_{C3} + j \cdot X_{C3}) \cdot (R_{C4} + j \cdot X_{C4})}{(R_{C3} + j \cdot X_{C3}) + (R_{C4} + j \cdot X_{C4})} = \frac{(0,0684 + j \cdot 10,801) \cdot (0,0684 + j \cdot 10,801)}{(0,0684 + j \cdot 10,801) + (0,0684 + j \cdot 10,801)} = 0,0342 + j \cdot 5,4$$

$$Z_{C345} = Z_{C34} + Z_{C5} = 0,0342 + j \cdot 5,4 + 0,558 + j \cdot 0,224 = 0,5922 + j \cdot 5,624$$

$$Z_{c3456} = \frac{Z_{C345} \cdot Z_{C6}}{Z_{C345} + Z_{C6}} = \frac{(0,5922 + j \cdot 5,624) \cdot (0,1506 + j \cdot 9,62)}{(0,5922 + j \cdot 5,624) + (0,1506 + j \cdot 9,62)} = 0,256 + j \cdot 3,556$$

$\rightarrow Z_{c2}$

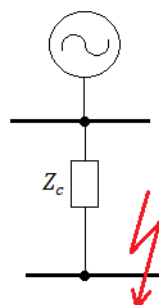
$$Z_{c12} = \frac{(R_{C1} + j \cdot X_{C1}) \cdot (R_{C2} + j \cdot X_{C2})}{(R_{C1} + j \cdot X_{C1}) + (R_{C2} + j \cdot X_{C2})} = \frac{(0,08 + j \cdot 4,427) \cdot (0,969 + j \cdot 39,229)}{(0,08 + j \cdot 4,427) + (0,969 + j \cdot 39,229)} = 0,0746 + j \cdot 3,978 \rightarrow Z_{c1}$$



Obr. 6-15 Postupné zjednodušení náhradního schéma R2 6 kV

$$Z_{c1} = 0,0746 + j \cdot 3,978$$

$$Z_{c2} = 0,256 + j \cdot 3,556$$



Obr. 6-16 Výsledné zjednodušení náhradního schéma R2 6 kV

Výsledná celková impedance zkratového obvodu:

$$Z_c = Z_{c1} + Z_{c2} = 0,0746 + j \cdot 3,978 + 0,256 + j \cdot 3,556 = 0,331 + j \cdot 7,534$$

Absolutní hodnota výsledné impedance:

$$|Z_c| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{0,331^2 + 7,534^2} = 7,541$$

Vztažený proud:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{900 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 86,603 \text{ kA}$$

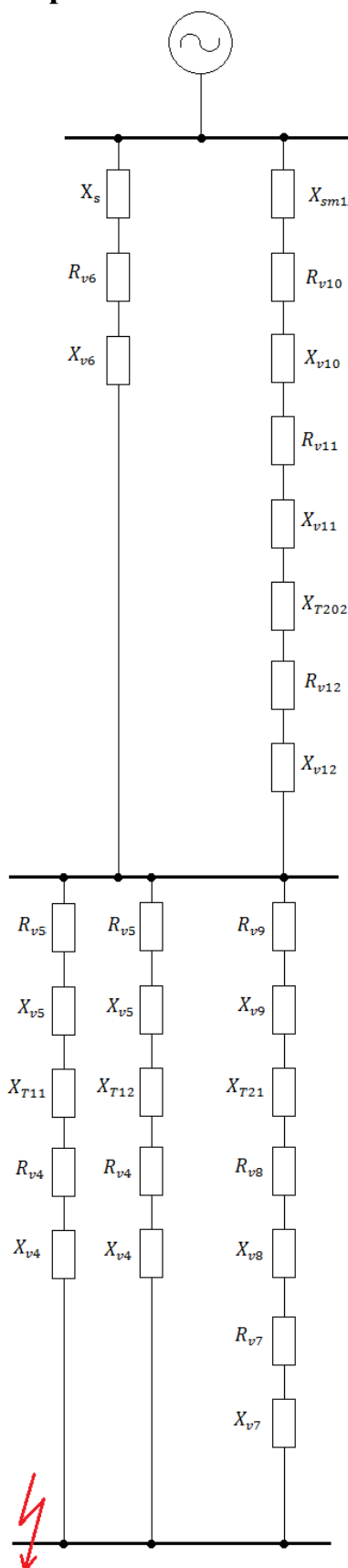
Počáteční souměrný rázový zkratový proud:

$$I_k'' = \frac{c \cdot I_v}{|Z_c|} = \frac{1,1 \cdot 86,603 \cdot 10^3}{7,541} = 12,633 \text{ kA}$$

Zkratový výkon:

$$S_k = \frac{c \cdot S_v}{|Z_c|} = \frac{1,1 \cdot 900 \cdot 10^6}{7,541} = 131,28 \text{ MVA}$$

6.6 Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R1 6 kV



Obr. 6-17 Náhradní schéma pro zkrat v rozvodně R1 6 kV

Reaktance soustavy:

$$X_s = \frac{c \cdot S_v}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 900 \cdot 10^6}{226 \cdot 10^6} = 4,38$$

Reaktance synchronního motoru:

$$X_{sm1} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{S_{M1}} = \frac{0,15 \cdot 900 \cdot 10^6}{4,2 \cdot 10^6} = 32,14$$

Reaktance transformátorů:

$$X_{T11} = \frac{u_{kT11}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T11}} = \frac{5,98}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} = 10,764$$

$$X_{T12} = \frac{u_{kT12}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T12}} = \frac{5,97}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} = 10,764$$

$$X_{T21} = \frac{u_{kT21}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T21}} = \frac{6,69}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{6,3 \cdot 10^6} = 9,557$$

$$X_{T202} = \frac{u_{kT202}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T202}} = \frac{7,3}{100} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 6,57$$

Činný odpor a induktivní reaktance V4:

$$R_{v4} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,03}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0559$$

$$X_{v4} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,03}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0293$$

Činný odpor a induktivní reaktance V5:

$$R_{v5} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,09}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,0125$$

$$X_{v5} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,09}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 7,36 \cdot 10^{-3}$$

Činný odpor a induktivní reaktance V6:

$$R_{v6} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,580}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,08$$

$$X_{v6} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,580}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,047$$

Činný odpor a induktivní reaktance V7:

$$R_{v7} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,194 \cdot 0,230}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,558$$

$$X_{v7} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,230}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,224$$

Činný odpor a induktivní reaktance V8:

$$R_{v8} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,239 \cdot 0,045}{3} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0896$$

$$X_{v8} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,045}{3} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0293$$

Činný odpor a induktivní reaktance V9:

$$R_{v9} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,220 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,061$$

$$X_{v9} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,220 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,036$$

Činný odpor a induktivní reaktance V10:

$$R_{v10} = \frac{R_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,37$$

$$X_{v10} = \frac{X_v \cdot l_v}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,195$$

Činný odpor a induktivní reaktance V11:

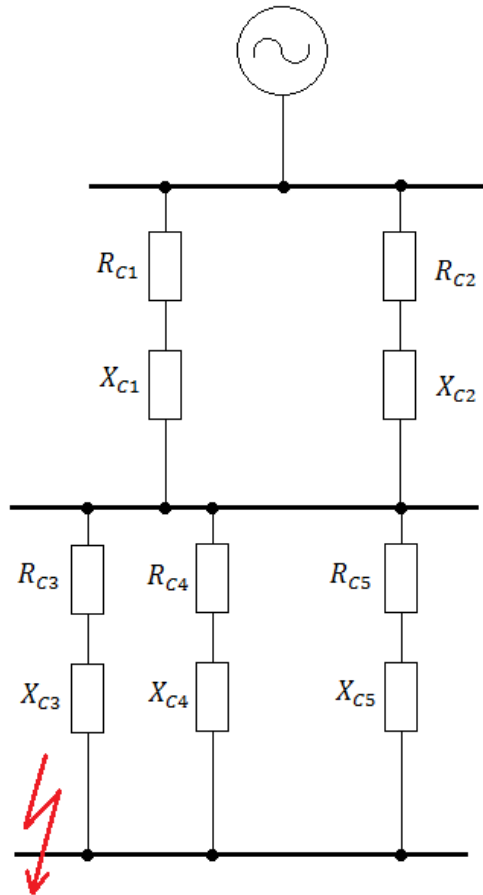
$$R_{v11} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,12 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,447$$

$$X_{v11} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 0,12 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,234$$

Činný odpor a induktivní reaktance V12:

$$R_{v12} = R_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,55 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,152$$

$$X_{v12} = X_v \cdot l_v \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,55 \cdot \frac{900 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,09$$



Obr. 6-18 Zjednodušení náhradního schéma R1 6 kV

$$R_{C1} = R_{v6} = 0,08$$

$$X_{C1} = X_s + X_{v6} = 4,38 + 0,047 = 4,427$$

$$R_{C2} = R_{C2} = R_{v10} + R_{v11} + R_{v12} = 0,37 + 0,447 + 0,152 = 0,969$$

$$X_{C2} = X_{sm1} + X_{v10} + X_{v11} + X_{T202} + X_{v12} = 32,14 + 0,195 + 0,234 + 6,57 + 0,09 = 39,229$$

$$R_{C3} = R_{v5} + R_{v4} = 0,0125 + 0,0559 = 0,0684$$

$$X_{C3} = X_{v5} + X_{T11} + X_{v4} = 7,36 \cdot 10^{-3} + 10,764 + 0,0293 = 10,801$$

$$R_{C4} = R_{v5} + R_{v4} = 0,0125 + 0,0559 = 0,0684$$

$$X_{C4} = X_{v5} + X_{T12} + X_{v4} = 7,36 \cdot 10^{-3} + 10,764 + 0,0293 = 10,801$$

$$R_{C5} = R_{v9} + R_{v8} + R_{v7} = 0,061 + 0,0896 + 0,558 = 0,7086$$

$$X_{C5} = X_{v9} + X_{T21} + X_{v8} + X_{v7} = 0,036 + 9,557 + 0,0293 + 0,224 = 9,846$$

$$Z_{C5} = R_{C5} + X_{C5} = 0,7086 + j \cdot 9,846$$

$$Z_{c12} = \frac{(R_{c1} + j \cdot X_{c1}) \cdot (R_{c2} + j \cdot X_{c2})}{(R_{c1} + j \cdot X_{c1}) + (R_{c2} + j \cdot X_{c2})} = \frac{(0,08 + j \cdot 4,427) \cdot (0,969 + j \cdot 39,229)}{(0,08 + j \cdot 4,427) + (0,969 + j \cdot 39,229)}$$

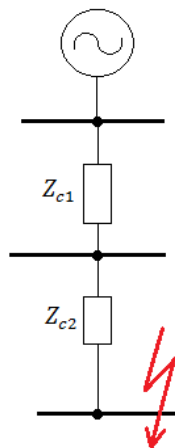
$$= 0,0746 + j \cdot 3,978 \rightarrow Z_{c1}$$

$$Z_{c34} = \frac{(R_{c3} + j \cdot X_{c3}) \cdot (R_{c4} + j \cdot X_{c4})}{(R_{c3} + j \cdot X_{c3}) + (R_{c4} + j \cdot X_{c4})} = \frac{(0,0684 + j \cdot 10,801) \cdot (0,0684 + j \cdot 10,801)}{(0,0684 + j \cdot 10,801) + (0,0684 + j \cdot 10,801)}$$

$$= 0,0342 + j \cdot 5,4$$

$$Z_{c345} = \frac{Z_{c34} \cdot Z_{c5}}{Z_{c34} + Z_{c5}} = \frac{(0,0342 + j \cdot 5,4) \cdot (0,7086 + j \cdot 9,846)}{(0,0342 + j \cdot 5,4) + (0,7086 + j \cdot 9,846)} = 0,103 + j \cdot 3,491$$

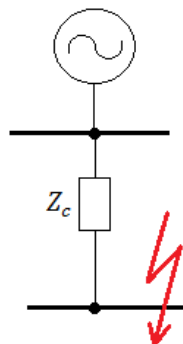
$$\rightarrow Z_{c2}$$



Obr. 6-19 Postupné zjednodušení náhradního schéma R1 6 kV

$$Z_{c1} = 0,0746 + j \cdot 3,978$$

$$Z_{c2} = 0,103 + j \cdot 3,491$$



Obr. 6-20 Výsledné zjednodušení náhradního schéma R1 6 kV

Výsledná celková impedance zkratového obvodu:

$$Z_c = Z_{c1} + Z_{c2} = 0,0746 + j \cdot 3,978 + 0,103 + j \cdot 3,491 = 0,1776 + j \cdot 7,469$$

Absolutní hodnota výsledné impedance:

$$|Z_c| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{0,1776^2 + 7,469^2} = 7,471$$

Vztažný proud:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{900 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 86,603 \text{ kA}$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud:

$$I_k'' = \frac{c \cdot I_v}{|Z_c|} = \frac{1,1 \cdot 86,603 \cdot 10^3}{7,471} = 12,751 \text{ kA}$$

Zkratový výkon:

$$S_k = \frac{c \cdot S_v}{|Z_c|} = \frac{1,1 \cdot 900 \cdot 10^6}{7,471} = 132,51 \text{ MVA}$$

7. Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval poruchovým jevem v elektrizační soustavě, který nazýváme zkrat. Zkrat patří k nežádoucím stavům, protože je častou příčinou požárů, kde následně vznikají velké finanční škody, v jiném případě může ohrozit zdraví člověka. Z toho důvodu je vhodné elektrická zařízení navrhnout tak, aby odolali nepříznivým účinkům zkratkových proudů. Pro správné dimenzování elektrického přístroje je důležité stanovit velikost zmiňovaných zkratkových proudů. Pro stanovení jejich hodnot se zabývá ČSN EN 60909 v trojfázových elektrizačních soustavách.

V úvodní části jsem popsal definice zkratu, příčiny vzniku zkratu a dále jsem se zabýval popisem jednotlivých druhů zkratu v trojfázové soustavě. Posléze jsem se zabýval metodou souměrných složek impedancí, které slouží k výpočtu zkratkových proudů pro jednotlivý druh zkratu.

V následující kapitole jsem popsal výpočet zkratkových proudů podle ČSN EN 60909. Tato norma určuje pravidla výpočtů zkratkových proudů a následně definuje vztahy pro stanovení zkratkových impedancí jednotlivých elektrických zařízení v elektrizační soustavě.

Praktická část obsahuje výpočet zkratkových proudů v rozvodnách průmyslového podniku. Cílem praktického příkladu bylo vypočítat zkratové proudy a zkratové výkony jednotlivých rozvodů.

Literatura:

- [1] ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Praha : Český normalizační institut, 2002
- [2] Pauza, J.: Zkraty v elektrických rozvodech, Praha, SNTL, 1970
- [3] Gurecký Jiří: Přenos a rozvod elektrické energie, skripta VŠB – TUO
- [4] Hradílek, Z.:Elektroenergetika II.,skripta VŠB Ostrava, 1993
- [5] Trojánek, Z.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách. SNTL, Praha 1987
- [6] Zkraty v elektrických rozvodech nn. [online]. 2007, č. 7. Dostupné z:
<http://www.odbornecasopisy.cz/download/elektro/2007/el060742.pdf>
- [7] Jak se správně píše...?. [online]. 2014. Dostupné z:
http://feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/informace/jaksepi.htm
- [8] http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Short_Circuit_Calculation